

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA E
INVESTIGACIÓN EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO EN LA RECARGA
POTENCIAL DE ACUÍFEROS

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA:

DALINDA RAMÍREZ SÁNCHEZ

Bajo la supervisión de:

DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ



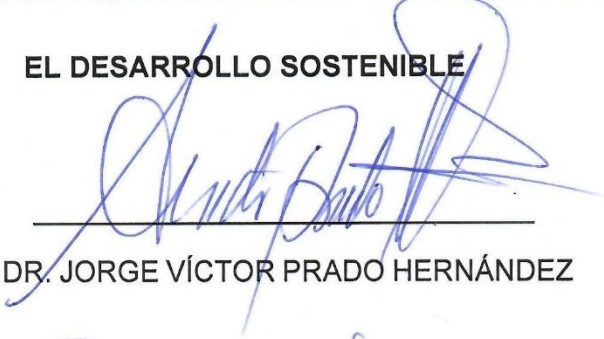
Chapingo, Estado de México, Mayo de 2024

**INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO EN LA
RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS**

Tesis realizada por **DALINDA RAMÍREZ SÁNCHEZ** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

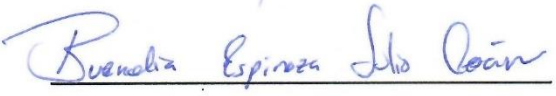
**MAESTRA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR



DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR



DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

ASESOR



MC. MELCHOR RODRÍGUEZ ACOSTA

CONTENIDO

CONTENIDO	III
ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
DEDICATORIAS	XI
AGRADECIMIENTOS	XII
DATOS BIOGRÁFICOS	XIII
RESUMEN GENERAL	XIV
GENERAL ABSTRACT	XV
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 Objetivo general	3
1.3 Objetivos específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Cobertura y usos de suelo:	4
2.2. Recarga potencial de acuíferos	5
2.2.1. Escorrentía	7
2.2.2. Infiltración	8
2.2.3. Delimitación de las áreas de estudio con base en la cobertura vegetal	9
2.2.4. Cuenca Río Tecolutla	9

2.2.5. Acuífero Tecolutla	10
2.2.6. Calibración de un modelo matemático analítico para estimar escorrentía superficial	11
2.2.7. Simulación matemática del fenómeno lluvia-escorrentía en la cuenca del Río Tecolutla	11
2.2.3 Literatura citada	12
3. INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO EN LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS	17
3.1. Resumen	17
3.2. Abstract	18
3.3. INTRODUCCIÓN	19
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.4.1. Sitio de estudio	20
3.4.2. Cuencas de estudio	21
3.4.3. Recarga potencial del acuífero	28
3.4.4. Escorrentía superficial	30
3.4.5. Precipitación	39
3.4.6. Evapotranspiración	41
3.4.7. Retención por follaje	41
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.5.1. Escorrentía superficial	42
3.6 CONCLUSIONES	54
3.7 Literatura citada	55
4. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y RECARGA POTENCIAL AL ACUÍFERO TECOLUTLA MEDIANTE EL MODELO HEC-HMS	58
4.1 Resumen	58

4.2 Abstract	59
4.3 INTRODUCCIÓN	60
4.4 MATERIALES Y MÉTODOS	61
4.4.1. Sitio de estudio.....	61
4.4.2. Cuencas de estudio.....	62
4.4.3. Modelación de escorrentía superficial con HEC-HMS.....	70
4.4.4. Registro de la lluvia	71
4.4.5. Obtención del número de curva	73
4.4.6. Implementación del hidrograma unitario del SCS	74
4.4.7. Registro de los Hidrogramas de escorrentía medidos.....	75
4.4.8. Calibración del modelo HEC-HMS	83
4.4.9. Evaluación del modelo	83
4.4.10. Recarga potencial	84
4.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS	85
4.5.1 Modelación de la escorrentía superficial	86
4.5.2 Calibración de la escorrentía superficial.....	90
4.5.3 Recarga potencial anual del acuífero	96
4.5. CONCLUSIONES.....	97
4.6 LITERATURA CITADA	98

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de las microcuencas delimitadas.....	24
Cuadro 2. Valores de Materia orgánica, Punto de marchitez permanente y Capacidad de campo de los suelos de las microcuencas analizadas.....	29
Cuadro 3. Volumen y láminas de escurrimiento de los sistemas de producción.	47
Cuadro 4. Recarga potencial al acuífero por sistema productivo.....	48
Cuadro 5. Características de las microcuencas delimitadas.....	65
Cuadro 6. Eventos de lluvia evaluados.....	83
Cuadro 7. Valores de Materia orgánica, Punto de marchitez permanente y Capacidad de campo.	85
Cuadro 8. Volumen y láminas de escurrimiento de los sistemas de producción.	86
Cuadro 9. Parámetros para alimentar el modelo HEC-HMS.....	87
Cuadro 10. Coeficiente de Nash-Sutcliffe de las simulaciones sin calibrar.	90
Cuadro 11. Volumen y láminas de escurrimiento de los sistemas de producción.	95
Cuadro 12. Tiempo de retraso y número de curva ajustado.	95
Cuadro 13. Calidad de la modelación en función del índice de Nash- Sutcliffe.	96
Cuadro 14. Recarga potencial al acuífero estimado mediante la simulación optimizada con el modelo de HEC-HMS.	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.	21
Figura 2. Ubicación de las Microcuencas dentro del predio del Campo Experimental del INIFAP “Las Margaritas”.	23
Figura 3. Uso de suelo del sistema agroforestal silvopastoril.	25
Figura 4. Uso de suelo del área de reforestación de bambú.	26
Figura 5. Uso de suelo del área de plantación de bambú.	27
Figura 6. Uso de suelo del área “testigo” Selva alta perennifolia.	28
Figura 7. Microcuenca del sistema agroforestal silvopastoril.	31
Figura 8. Microcuenca del área de reforestación.	32
Figura 9. Microcuenca del área de plantación de Bambú.	33
Figura 10. Microcuenca del sitio testigo de Selva alta perennifolia.	34
Figura 11. Fotografías de los sitios de aforo del a) Sistema agroforestal Silvopastoril, b) Reforestación, c) d) Selva alta perennifolia.	35
Figura 12. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área del sistema silvopastoril.	36
Figura 13. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de reforestación.	36
Figura 14. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de plantación de bambú.	37
Figura 15. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de Selva alta perennifolia.	37
Figura 16. Equipo de medición (a) instalación de tubos de pvc; b) instalación de caseta; c) sensor ultrasónico; d) sensor de presión; e) instalación de panel solar; f) paneles solares; g) batería con equipo ultrasónico; h) equipo con sensor de presión.	38

Figura 17. Fotografías de los sitios de aforo de: a) Sistema Silvopastoril, b) Reforestación, c) plantación forestal y d) Selva alta perennifolia.	39
Figura 18. Pluviómetro Davis® automatizado.....	40
Figura 19. Precipitaciones registradas en el INIFAP “Las Margaritas”	40
Figura 20. Caudal registrado el 23 y 24 de abril del 2023, en los sistemas de: a) Sistema silvopastoril y b) Área de forestación de bambú.	43
Figura 21. Caudal registrado el 25 de agosto del 2023 en los sistemas: a) silvopastoril; b) plantación de bambú y d) selva alta perennifolia.....	45
Figura 22. Caudal registrado en el sistema silvopastoril el 9 de septiembre del 2023.....	46
Figura 23. Comparación de precipitación y % de Recarga potencial de acuíferos en cada uso de suelo.	49
Figura 24. Comparativo de recarga potencial con intensidad de lluvia promedio y máxima.....	50
Figura 25. Histograma de las precipitacionesdel año 2023.....	51
Figura 26. Intensidad de lluvia del 23 y 24 de abril del 2023.	53
Figura 27. Ubicación de la Cuenca del Río Tecolutla.	62
Figura 28. Ubicación de las Microcuencas dentro del predio del Campo Experimental del INIFAP “Las Margaritas”.....	64
Figura 29. Uso de suelo del sistema agroforestal silvopastoril.	66
Figura 30. Uso de suelo del área de reforestación de bambú.	67
Figura 31. Uso de suelo del área de plantación de bambú.....	68
Figura 32. Uso de suelo del área “testigo” Selva alta perennifolia.	69

Figura 33. Sitios de medición de escorrentía superficial: a) Sistema silvopastoril, b) reforestación de bambú, c) plantación de bambú y c) selva alta perennifolia.....	70
Figura 34. Diagrama de flujo del proceso de modelación hidrológica.	71
Figura 35. Pluviómetro Davis® automatizado.....	72
Figura 36. Historial de precipitación.....	73
Figura 37. Microcuenca del sistema agroforestal silvopastoril.	76
Figura 38. Microcuenca del área de reforestación.	77
Figura 39. Microcuenca del área de plantación de Bambú.	78
Figura 40. Microcuenca del sitio testigo de Selva alta perennifolia.	79
Figura 41. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área del sistema silvopastoril.	80
Figura 42. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de reforestación.	80
Figura 43. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de plantación de bambú.	81
Figura 44. Ecuación de calibración de selva alta perennifolia.	81
Figura 45. Equipo de medición (a) instalación de tubos de pvc; b) instalación de caseta; c) sensor ultrasónico; d) sensor de presión; e) instalación de panel solar; f) paneles solares; g) batería con equipo ultrasónico; h) equipo con sensor de presión.	82
Figura 46. Antecedente de humedad registrado.	87
Figura 47. Caudal simulado en el HEC-HMS y observado el 23 y 24 de abril del 2023, en los sistemas de: a) Sistema silvopastoril y b) Área de forestación de bambú.	89

Figura 48. Caudal simulado en el HEC-HMS y observado el 25 de agosto del 2023, en los sistemas de: a) Sistema silvopastoril y b) plantación de bambú y c) “área testigo” de Selva alta perennifolia.....	90
Figura 49. Caudal simulado en el HEC-HMS y observado el 9 de septiembre del 2023, en el sistema Sistema silvopastoril.	90
Figura 50. Caudal ajustado en el HEC-HMS y observado el 23 y 24 de abril del 2023, en los sistemas de: a) Sistema silvopastoril y b) Área de forestación de bambú.....	92
Figura 51. Caudal ajustado en el HEC-HMS y observado el 25 de agosto del 2023, en el sistema “Testigo de Selva alta Perennifolia”.....	93
Figura 52. Caudal ajustado en el HEC-HMS y observado el 9 de septiembre del 2023, en el sistema Sistema silvopastoril.	94

DEDICATORIAS

A mi madre por ser un ejemplo de fuerza, constancia y apoyo incondicional para sacar adelante a la familia.

A mi padre quien me ha brindado protección y amor aún estando en el cielo.

A mi hija quien con su amor incondicional y ternura me impulsa a ser mi mejor versión.

A mis amigo(a)s por brindarme el soporte y cariño en los momentos más difíciles.

A mi familia que son mi ejemplo para seguir aprendiendo y fortaleciendo el amor conciencia.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para sostener mis estudios de posgrado y tesis.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al posgrado de Agroforestería para el desarrollo sostenible quien me dio la oportunidad de crecer profesionalmente.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández por haberme guiado, financiado y por su confianza en mí para realizar esta tesis.

A la Dra. Marta quien facilitó el apoyo en el INIFAP del Campus Margaritas, así como a los Mc. Melchor Rodríguez Acosta, Mc. Pedro, a la Ing., Mari, al C. Rafael, C. Avelino, por su apoyo, paciencia y acompañamiento en la etapa de campo.

A mi madre, a mi hermano Obed y su esposa Areli, para poder realizar mis salidas a campo, sin ellos esta tesis no hubiera sido posible.

A mi gran amigo y confidente Eduardo por su paciencia, amor y sostenimiento para realizar el posgrado.

A mi gran amigo Javier quien siempre me ha brindado su mano y confianza para seguir creciendo humana y profesionalmente.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Dalinda Ramírez Sánchez

Fecha de nacimiento 29 de noviembre de 1989

Lugar de nacimiento San Martín Caltenco

CURP RASD892911MPLMNL05

Cédula profesional 12870657



Desarrollo académico:

Educación media superior: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2004-2007.

Licenciatura: Ingeniería en restauración forestal, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2007-2011.

Maestría en ciencias Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de enseñanza e investigación en suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Generación 2022-2023

INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO EN LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS

RESUMEN GENERAL

La gran demanda y baja eficiencia en el uso del agua en el sector agrícola, sumado a la deforestación acelerada en el país dificultan el equilibrio hídrico de los acuíferos. Por lo anterior, se planteó evaluar la influencia de la cobertura vegetal y uso de suelo en la recarga potencial del acuífero Tecolutla en cuatro microcuencas, cuyos sistemas de producción son: silvopastoril (SP), reforestación de bambú (RB), plantación de bambú (PB) y selva alta perennifolia (SAP) como testigo. La estimación de la recarga se hizo con un balance de aguas y con el modelo hidrológico HEC-HMS calibrado; para ello se midieron de manera automatizada la precipitación y la escorrentía superficial de tres eventos de lluvia en 2023. Con la primera metodología, la recarga potencial porcentual respecto a la precipitación fue de: 36.6 a 84.1% en SP, 72.6% en RB, 39.8% en PB y 36.6% en SAP. La simulación con HEC-HMS mostró semejanza en los volúmenes de escorrentía y caudales pico observados; sin embargo, la representación de la evolución temporal de la escorrentía fue compleja, por tratarse de cuencas pequeñas como lo han manifestado otras investigaciones, con recargas potenciales de: 95% en RB, 52.2 a 91.5% en SP, 71.1% en PB y 67.9% en SAP. Con excepción de SP, en ambas metodologías se observó el mismo orden en el impacto en la recarga; en SP fue de los más altos, debido a su relieve ondulado en la mayor parte de la microcuenca y en el sistema testigo (SAP) fue el más bajo por tener el relieve más empinado y una mayor red de drenaje. Los sistemas analizados funcionan actualmente como captadores y reguladores del recurso hídrico, proceso que puede ser representado en microcuencas por el modelo HEC-HMS, considerando sus características topográficas, de lluvia, de drenaje superficial y tipo de suelo.

Palabras clave: Microcuencas, Cobertura vegetal, escorrentía, precipitación, recarga potencial de acuífero.

Tesis de maestría en Agroforestería, Posgrado en Agroforestería para el desarrollo sostenible, Universidad Autónoma, Chapingo.

Autor: Dalinda Ramírez Sánchez

Director Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

INFLUENCE OF VEGETATION COVER AND LAND USE ON THE POTENTIAL RECHARGE OF AQUIFERS

GENERAL ABSTRACT

The high demand and low efficiency in the use of water in the agricultural sector, together with the accelerated deforestation in the country, hinder the water balance of aquifers. Therefore, the influence of vegetation cover and land use on the potential recharge of the Tecolutla aquifer was evaluated in four micro-watersheds, whose production systems are: silvopastoral (SP), bamboo reforestation (RB), bamboo plantation (PB) and high evergreen forest (SAP) as a control. Recharge estimation was done with a water balance and with the calibrated HEC-HMS hydrological model; for this purpose, rainfall and surface runoff from three rainfall events in 2023 were measured in an automated manner. With the first methodology, the percentage potential recharge with respect to precipitation was: 36.6 to 84.1% in SP, 72.6% in RB, 39.8% in PB and 36.6% in SAP. The simulation with HEC-HMS showed similarity in the runoff volumes and peak flows observed; however, the representation of the temporal evolution of runoff was complex, since these are small watersheds as other studies have shown, with potential recharge of: 95% in RB, 52.2 to 91.5% in SP, 71.1% in PB and 67.9% in SAP. With the exception of SP, in both methodologies the same order in the impact on recharge was observed; in SP it was one of the highest, due to its undulating relief in most of the microbasin, and in the control system (SAP) it was the lowest because it has the most undulating relief in most of the microbasin, while in the control system (SAP) was the lowest because it has the steepest relief and a larger drainage network. The systems analyzed currently function as water resource collectors and regulators, a process that can be represented in micro-watersheds by the HEC-HMS model, considering their topographic, rainfall, surface drainage and soil type characteristics.

Keywords: micro-watershead, vegetation cover, runoff, potential recharge of aquifers.

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

Author: Dalinda Ramírez Sánchez.

Advisor: Dr. Jorge Víctor Jorge Hernández.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Anualmente México recibe 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, de ese volumen, alrededor del 72.1% se va en evapotranspiración, regresando a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos y el 6.4% se infiltra al subsuelo de forma natural recargando los acuíferos. Del agua precipitada, el país cuenta con 451,584.7 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, usando el 60.8% del agua superficial (ríos, arroyos y lagos) y el 39.2% se extrae de los acuíferos del cual se extrae de 65 a 75.7% de agua para la agricultura, el 14.7-17% al abastecimiento público, el 4.9-18% a la industria autoabastecida y el 4.7% a la energía eléctrica (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019; Spillias et al, 2023; Mekonnen & Manderso, 2023), Es por ello que la extracción del agua ha mermado la disponibilidad de este recurso, comprometiendo la inseguridad hídrica a nivel mundial (MacAlister et al., 2023).

El cambio de uso de suelo, ocasionado por la tala de áreas forestales, es una actividad que disminuye 212,070 ha al año 2001-2018 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2020) a nivel nacional, cediendo al uso agrícola y/o ganadero (FAO, 2023) ocasionando la disminución de las áreas potenciales para la recarga de aguas subterráneas (Shrestha et al., 2023), impactando negativamente en la hidrología de las cuencas (Mekonnen & Manderso, 2023), como es en el escurrimiento superficial (Bettoni et al., 2023), en el flujo base, la humedad del suelo (Ruíz-García et al., 2022), evapotranspiración (Ortiz-Oliveros et al., 2022), entre otros.

El sitio de estudio se ubica en el municipio de Hueytamalco, en el estado de Puebla, dentro de la región hidrológica 27 Tuxpan-Nautla, en la cuenca del Río Tecolutla (CONAGUA, 2020), aunque es un acuífero que actualmente no presenta un estatus de Veda o de sobreexplotación, si ha disminuido significativamente el caudal de los manantiales y arroyos del municipio, al ser la fuente principal de obtención del agua para diversos usos como es la ganadería (44%) y la agricultura (42%) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021), lo que podría poner en riesgo el estatus del acuífero en un futuro si no se realizan las precauciones debidas, en relación al cambio de uso de suelo.

Ante la evidente disminución de la cobertura vegetal arbórea para el uso agrícola y ganadero en el municipio, es necesario conocer el comportamiento del proceso hidrológico en diferentes coberturas y usos de suelo para estimar la recarga potencial de acuíferos, usando diversas metodologías, no obstante, para este proyecto se hizo a partir de un balance de aguas, en el que se puede medir las entradas y salidas. Para justificar la metodología, se revisó información nacional e internacional con diferentes metodologías y resultados con los que estimaron recarga de acuíferos y escurrimiento.

Algunos investigadores que evaluaron el efecto del cambio de uso de suelo en la recarga de agua subterránea a través del tiempo, son Siddik et al. (2022) y Ashaolu et al. (2019). Siddik hizo un estudio en Bangladesh, encontrando una disminución de 2.6 mm/año de la recarga subterránea en la cuenca y a nivel regional es de 17.1 mm/año en el lapso de 10 años debido al aumento de la mancha urbana, para ello implementó la metodología de modelo WeSpass que es un modelo de balance hídrico, que también implementó Ashaolu et al. (2019) en Nigeria, donde la precipitación media es de 1020 mm a 1520 mm y una media en la estación seca de 127 a 178 mm, se obtuvo por tres años (1984, 2000 y 2015) en diferentes usos de suelo una recarga subterránea de 476.54, 411.07 y 430 mm/año respectivamente, donde el mes de septiembre fue el de mayor recarga entre 118.45 – 174.59 mm entre el año 2000 y en 2015 estuvo entre 121.54 – 138.61 mm. Obteniéndose mayor porcentaje de recarga en las áreas con cobertura de bosque principalmente y en segundo lugar las tierras desoladas y como tercer las áreas de cultivo o matorrales, además se obtuvo que entre 1984 al 2015 la recarga subterránea disminuyó en un 10% debido al decrecimiento del área forestal.

En la mayoría de los estudios se han realizado simulaciones de precipitación escurrimiento mediante modelos hidrológicos que implementan información de las estaciones hidrológicas oficiales de gobierno, no obstante en México es limitada la información de estudios hidrológicos en cuencas, por lo que hay un desequilibrio entre la disponibilidad hídrica y lo concesionado, es por ello que para este estudio se colocaron pequeñas estaciones in situ en cada microcuenca propuesta en diferente uso y cobertura de suelo que permitió tener datos de primera mano, en el área delimitada en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP] “Las Margaritas”, en el

municipio de Hueytamalco, Puebla y posteriormente se realizó la calibración del modelo de infiltración del método del número de curva y la simulación por medio del software HEC-HMS, con el que se obtuvo el escurrimiento superficial e infiltración de la cuenca del Río Tecolutla. De esta forma se ha dejado el antecedente cuantitativo de infiltración y escurrimientos que brinden diferentes tipos de cobertura y uso de suelo en la Cuenca, que podría ser implementado por programas gubernamentales hídricos para fomentar actividades productivas y de conservación para el sostenimiento y abasto del recurso hídrico al sector agrícola/pecuario, a las poblaciones y a la industria.

1.1 OBJETIVOS

1.2 Objetivo general

Evaluar la influencia de la cobertura vegetal y uso del suelo en cuatro microcuencas del INIFAP “Las Margaritas”, Veracruz, en la recarga potencial del acuífero Tecolutla, para identificar los manejos más apropiados que contribuyan en la gestión sustentable del recurso hídrico.

1.3 Objetivos específicos

1. Delimitar las áreas de estudio con base en la cobertura vegetal, usos de suelo, topografía y clima.
2. Estimar la infiltración en diferentes tipos de cobertura y usos de suelo mediante un balance de agua que permitan elegir los de mayor recarga potencial de acuíferos.
3. Identificar la influencia de las características de la lluvia, tipo de suelo, vegetación y topografía, en el comportamiento de la escorrentía superficial e infiltración en el suelo.
4. Calibrar un modelo hidrológico para estimar escorrentía superficial e infiltración en diferentes tipos y usos de suelo, que permitan hacer estimaciones en microcuencas no aforadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cobertura y usos de suelo:

De acuerdo a la información del INEGI (2017) la cobertura arbórea es la porción relativa de los elementos arbóreos con base a la distancia entre sus copas y los cambios en la cobertura de la tierra y su uso tiene consecuencias en los sistemas globales, como en los servicios ecosistémicos relacionados con la hidrología (Li et al., 2023; Lei, Wagner & Fohrer, 2022). Ya que cuando las áreas cubiertas por bosque son sustituidas por áreas agrícolas, pastizales o urbanas el nivel de recarga de agua subterránea se ve reducida por la extracción del agua para las actividades humanas (Sajjad et al., 2022; Spillias et al., 2023; Mekonnen & Manderso, 2023). Esto influye en diferente nivel para la conservación y sustentabilidad del uso de la tierra (Wang et al., 2023). Algunas de estas consecuencias son la variación en las características del agua en el suelo, en el dosel del sotobosque, influyendo en el índice de la escorrentía, pérdida de nutrientes y sedimentos. Sin embargo, se ha encontrado que la cobertura de dosel mejora la infiltración (Zhang et al., 2021; Abril, López & Mera, 2017) en concordancia con Stadtmüller (1994), menciona que el desarrollo de las raíces de la vegetación (Matali, 2023), dan paso a una alta capacidad de infiltración de los suelos forestales, que presentan materia orgánica responsable del mejoramiento de la estructura del suelo. Aunado a ello, el follaje amortigua el golpeteo de las gotas de lluvia. Por lo que la cobertura es de gran influencia para la recarga de agua subterránea (Salem, Abduljaleel & Lóczy, 2023) y responde diferente, de acuerdo a la textura del suelo y al clima (Han et al., 2017).

En los estudios revisados se implementaron imágenes satelitales de Landsat obtenidas de USGS (Science for a changing world) en diferentes años, para poder realizar la comparación de los diferentes usos de cobertura o uso de suelo a través de los años, alguno de los programas usados fue ERDAS Imagine 2014 (Abuhay, Gashaw, Tsegaye., 2023), o del Global Visualization Viewer (GLOVIS), (Li et al., 2023; Sajjad et al., 2022), así como el programa SWAT para conocer los cambios de la cantidad del agua que ocurrieron en la cuenca a través del tiempo. (Lei, Wagner & Fohrer, 2022).

2.2. Recarga potencial de acuíferos

La recarga potencial de acuíferos, representa el agua precipitada que tiene la posibilidad de infiltrarse en el suelo a través de los espacios porosos hacia el nivel freático, sumándose al agua que se retiene en la zona denominada acuífero, típicamente formado por arenas, gravas, areniscas y calizas (Mace, 2023).

El agua de los acuíferos es extensamente utilizada en el mundo y de acuerdo a la (CONAGUA, 2019), en México se usa principalmente para la actividad agrícola, extrayendo un 75.7%, no obstante, su demanda incrementa (Nag et al., 2022), dado el cambio de uso de suelo que ha aumentado significativamente a través del tiempo, sustituyendo las bosques por áreas agrícolas, pastizales o urbanas, lo que ha ocasionado la disminución de la superficie potencial de recarga de acuíferos y con ello el aumento del escurrimiento superficial (Mengistu et al., 2022). Puesto que la recarga de acuíferos, depende de la capacidad de infiltración del suelo y esto a su vez del tipo de suelo, actualmente se enfrenta una problemática para su recarga, ya que sólo el 1% al 18% del agua de lluvia precipitada llega a formar parte de estos (Andualem et al., 2021). Aunque para algunos esta cantidad de agua almacenada en los acuíferos es muy alta dada la idea de maximizar el beneficio económico del agua, para otros es poca el agua disponible para su uso (Mace, 2023). Es por ello que se debe cuantificar el volumen de agua que entra a un sistema y que sale, como es la lluvia y el caudal como salida. Para el presente proyecto se usará la Ecuación fundamental del balance de agua, que se basa en el principio de conservación de la masa, en la diferencia de entradas “E” y salidas “S” que equivale a la variación del almacenamiento “ ΔA ” (Sokolov & Chapman, 1974):

$$E - S = \Delta A \quad (1)$$

Estimar la recarga de acuíferos no es una tarea fácil, no obstante, algunas de las estimaciones que se realizan son directas e indirectas, dentro de las formas directas se tiene la geoquímica, la física y por métodos climáticos. El método climático o el método de balance del agua es fácil de usar y se puede disponer de los datos de entrada implementando la siguiente Ecuación (Salem, Abduljaleel & Lóczy, 2023; Nyembo et al.,

2022; Siddik et al., 2022; Zhang et al., 2021; Kalédjé et al., 2020; y Rezaei & Mohammadi, 2017).

$$R = P - (ET + Q) \quad (2)$$

Donde: R es la recarga subterránea, P es precipitación, ET es la evapotranspiración y Q es el escurrimiento superficial.

Schosinsky (2006) sustituye la evapotranspiración por retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret) expresando la siguiente Ecuación:

$$P = Ret + Q + R \quad (3).$$

Para el cálculo de la recarga potencial, Schosinsky (2006) propone una ecuación en donde se sustituye el escurrimiento superficial por la humedad del suelo inicial y final (Hsi y Hsf) del mes (mm), expresando la ecuación de la siguiente manera:

$$R = I + HSi - HSf - ET \quad (4)$$

Donde I es la precipitación que se infiltra (mm/mes). Dado que el agua de lluvia ha satisfecho la evapotranspiración de las plantas y la cantidad de agua que se infiltra es suficiente para llevar a cabo la capacidad de campo, entonces el agua que sobra llega a formar parte de la recarga de acuífero.

En relación a la cantidad de agua captada por diferentes sistemas de producción se registró que, para un pastizal a pleno sol y un sistema silvopastoril con eucalipto (Bosi, Pezzopane & Sentelhas, 2020), este último consumía mayor cantidad de agua pero, también captan mayor cantidad de agua durante la lluvia y su sombra entre hileras permite conservar mayor humedad en el suelo contribuyendo a la recarga del agua, no siendo de esta forma en el sistema de pastizal a pleno sol al tenerse menor humedad del suelo. Puesto que la sombra y la presencia de biomasa de la hojarasca mantienen la humedad en el suelo, además de aumentar la tasa de infiltración de lluvia (Liu et al., 2022).

2.2.1. Escorrentía

Cuando la tasa de lluvia excede la tasa de infiltración comienza el escurrimiento superficial moviéndose el agua sobre la superficie de la tierra (Mace, 2023;). No obstante, el agua que fluye por debajo de la superficie podría observarse en su incorporación en escorrentías superficiales y viceversa. Es decir, que esta agua puede recargar los acuíferos y alimentar humedales naturales y manantiales (Mace, 2023). Su medición es importante para poder realizar un manejo de cuencas más adecuado como son los planes de restauración, (Blöschl, 2013), conservación, promoción de desarrollo sustentable y conservación de ecosistemas (Li et al., 2023). Puesto que actualmente el cambio de uso de suelo ha disminuido las áreas con bosque y ello ha aumentado el escurrimiento superficial (Mosbahi et al., 2023; Salem, 2023). Una de las alternativas que disminuyen el escurrimiento es la presencia de raíces en el suelo, ya que mejoran las condiciones del suelo y reducen la escorrentía de agua de lluvia, (Matali, Rahman & Ratnayake, 2023). Es por ello que la cobertura que esté en el suelo y su dinámica deben ser investigados con el fin de realizar estrategias de gestión para el desarrollo sustentable de las cuencas (Mengistu et al., 2022).

Para medir la escorrentía, generalmente se implementan sitios de aforo en caudales principales, por lo que estos sitios son permanentes, en los cuales se registran los datos. Algunos de los trabajos donde se requirieron los datos de aforo para conocer su impacto por el cambio de uso de suelo son los de (Salem et al., 2023; Abuhay, Gashaw & Taegaye, 2023; Zhu et al., 2023; Siddik et al., 2022; Ashaolu, Olorunfemi & Ifabiyi 2019), quienes encontraron que con la disminución de la cobertura vegetal también disminuye la recarga de agua es decir las áreas potenciales para el proceso de infiltración. No obstante, también es importante conocer a nivel cuenca mediante la medición in situ, el comportamiento de las escorrentías en diferentes sistemas productivos, como es la agroforestería, que entre una de sus funciones principales de servicio ecosistémico es la recarga de agua. (Udawatta & Gantzer, 2022; Udawatta, Rankoth & Jose, 2019).

2.2.2. Infiltración

La infiltración se refiere al movimiento del agua que ocurre desde la superficie del suelo hacia debajo de este. (Mace, 2023). Este fenómeno ocurre dentro del ciclo hidrológico mediante el cual, el agua precipitada atraviesa la superficie del terreno y ocupando total o parcialmente los poros, fisuras y oquedades del suelo. (NOM-015, 2023), además, la infiltración total en un área vale la precipitación (en sus distintas formas, lluvias, nieve, etc.), menos la evaporación del agua superficial en la cuenca y la acumulada en depresiones. (Sokolov & Chapman, 1974). Sin embargo, la capacidad de infiltración del suelo se ve influenciada por la cubierta vegetal (Janeth Béjar-Pulido Israel Cantú- Silva & Inés Yáñez-Díaz Erik Orlando Luna-Robles, 2021), ya que la vegetación al desarrollar raíces en el suelo a diferentes profundidades va abriendo el suelo creando canales que actúan como vías de flujo que toma el agua durante la infiltración y percolación del agua en el suelo, por el flujo capilar. No obstante, este efecto también dependerá de la textura del suelo, y la morfología de las raíces de la vegetación que modulan las propiedades del suelo, (Wang, Rao, Zhu, 2023; Matali, 2023; Wang et al., 2022). Durante el proceso de infiltración el agua debe escapar de la zona de las raíces a través de los poros, es decir del espacio que hay entre las partículas sólidas que forman el suelo y sedimentos. Los medios porosos generalmente están conectados y generalmente son geológicos como la arcilla, arena, arenisca, piedra caliza y esquisto que tienen poros. (Mace, 2023).

Debido a que en un evento de lluvia el agua puede distribuirse en diferentes lugares dentro de un sistema, es de gran importancia conocer las salidas principales de este y las causas que disminuyen la infiltración en el suelo, como es el alarmante cambio de uso de suelo donde, en vista de que se han reducido las áreas boscosas y sustituidas por áreas agrícolas, pecuarias o por el aumento de la mancha urbana, resultando en la disminución de las áreas potenciales de infiltración, que abastecen a los acuíferos que proveen del agua necesaria para las actividades humanas (Abuhay, Gashaw & Tsegaye, 2023; Xiao, Wang & Fu, 2023; Ashaolu, Olorunfemi & Ifabiyi 2019). No obstante, no sólo las áreas boscosas pueden mejorar la infiltración del suelo, en contraste con las áreas de cultivo que tienen menor capacidad de almacenar agua, una alternativa son los sistemas de producción diversificados como son los sistemas agroforestales, que

permitan un estrato arbóreo en donde hay cultivos, como se encontró en el estudio de Lan et al. (2021), en un huerto de manzanos, que mejoró la infiltración, lo cual se podría replicar en las cuencas, pudiendo, además disminuir inundaciones, sequías y variaciones climáticas (Mongil-Manso, Navarro-Hevia & San Martín, 2022).

Es por ello que se han realizado metodologías que permitan estimar la posible cantidad de agua de lluvia que se podría infiltrar o percolar hasta llegar al acuífero, algunas de estas son: directas, geoquímicas, físicas y climáticas, e indirectas. Conociendo la tasa de pérdida, se podría gestionar un menor manejo de los recursos naturales que permita la regulación del proceso hidrológico (Wang, Rao & Zhu, 2023).

Cabe mencionarse que son escasos los proyectos en donde se haga medición directa en campo en microcuencas de precipitación y escorrentía, debido a la complejidad socioeconómica para establecer un sitio de aforo en los caudales.

2.2.3. Delimitación de las áreas de estudio con base en la cobertura vegetal

Para la identificación y ubicación de los escurrimientos, se siguió la metodología de Matus, Jorge Faustino & Francisco Jiménez (2009), en la que se tomó en cuenta: la información cartográfica hidrológica del INEGI (2021), así como la generación de corrientes superficiales por medio de Sistemas de información geográfica, dicha información se reconoce en campo y se corrige en gabinete para poder delimitar las microcuencas. (Salem Abduljaleel & Lóczy, 2023; Abuhay, Gashaw & Taegaye, 2023; Zhu et al., 2023; Y. Wang et al., 2023; Siddik et al., 2022; Mengistu et al., 2022; Ashaolu, Olorunfemi & Ifabiyi 2019).

2.2.4. Cuenca Río Tecolutla

La cuenca hidrológica es el área de captación del agua de lluvia que en conjunto con el bosque mejora la funcionalidad hidrológica, en la que se ha observado que los árboles disminuyen la escorrentía superficial, aumentando la infiltración y la recarga de acuíferos con lo que se asegura el flujo base. (Esse et al., 2021). El área de estudio se ubica en la cuenca del río Tecolutla que es de tipo exorreica es decir que desemboca en el mar, y es relativamente pequeña con pendientes pronunciadas con un tiempo de concentración bajo teniendo un traslado de avenida del punto más alto al más bajo de 12 horas, ubicado

entre 19°28'10" y 20°30'45" de latitud norte y 96°57'39" y 98°14'30" de longitud oeste, tiene una superficie de 7,709 km², entre el estado de Puebla, Veracruz, Tlaxcala e Hidalgo. La cuenca colinda en la desembocadura con las llanuras de Tuxpan, al norte con el Río Cazonas, al sur con la cuenca del Río Libres Oriental y al este con la del Río Nautla. (Gobierno del Estado de Veracruz, n.d.). El río comienza en Tlaxcala a una altitud de 3500 msnm.

2.2.5. Acuífero Tecolutla

El área de estudio se encuentra dentro del acuífero Tecolutla que actualmente tiene una recarga total media anual (R_t) que corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como de recarga total media anual es de 2,204.3 hm³ /año de los cuales 2202.0 hm³ son recarga natural y 2.4 hm³ recarga incidental. Se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de 2,158.0 hm³ anuales, de los cuales 4.0 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interface marina, 86.8 hm³ al volumen de agua concesionado de los manantiales y 2067.2 hm³ al flujo base del Río Tecolutla. No se considera comprometida la evapotranspiración. El volumen de extracción de aguas subterráneas es de 33,016,502 m³ anuales, que reporta el Registro público de Derechos del agua de la Subdirección General de Administración del Agua a la fecha de corte del 30 de diciembre de 2023. Y la disponibilidad media anual de agua subterránea es de 13,283,498 m³ para otorgar nuevas concesiones.

Calibración de un modelo matemático analítico para estimar infiltración

Un modelo matemático que representa un fenómeno físico, es una herramienta que apoya para la toma de decisiones para el manejo sustentable, además de ser un medio invaluable de investigación que permite explorar escenarios futuros o pasados que permitirá prevenir impactos negativos en el medio ambiente. (Duran-Peralta et al., 2022). Para poder calibrar un modelo se requiere de variables que pueden ser medidas en campo proporcionando información local en determinados periodos de tiempo que permitirán observar la variabilidad de los parámetros climáticos (periodos secos y húmedos) (Ruíz-García et al., 2022).

2.2.6. Calibración de un modelo matemático analítico para estimar escorrentía superficial

Los modelos matemáticos se han creado para representar una realidad, en la cual se determina un sistema óptimo de ecuaciones que correspondan a la mejor función de entradas y salidas observadas, en las que se consideran leyes físicas (ecuaciones de energía, balances hídricos, ecuaciones de movimiento). Se presta a propósitos de predicción y control. Con ello se puede detectar en qué proporción las modificaciones de determinados aspectos del sistema afectarían otros aspectos o el sistema en conjunto.

Un modelo matemático analítico se usa para los casos menos complejos debido a que se conoce el dominio y se realiza a partir de ecuaciones conocidas. Para este proyecto se empleará la ecuación de escurrimiento curva numérica propuesto por Natural Resources Conservation Service - United State Department Agriculture [NRCS-USDA] 2004, Angulo & Saavedra, 2021).

No obstante, tienden a ser erróneos, aunque algunos son útiles, en las investigaciones es importante realizar mediciones directas con la finalidad de afinar un modelo matemático que pueda ser aplicado por otros investigadores para su posterior calibración acorde a sus condiciones, lo que les permitirá entender, cambiar, gestionar y controlar dicha parte de la realidad (García, 2023).

2.2.7. Simulación matemática del fenómeno lluvia-escorrentía en la cuenca del Río Tecolutla

La simulación matemática es una técnica que se implementa para producir eventos por medio de expresiones matemáticas, representando el comportamiento de datos medidos en campo (Sánchez, 1974); Los modelos reducidos o analíticos tienen como objetivo la simulación, para generar información que permite la planeación de los recursos hídricos. (Sahu, Shwetha y Dwarakish (2023).

La simulación matemática de un modelo hidrológico que suceden y transcurren en un determinado espacio, para una cuenca, tienen una aplicación importante para prevenir riesgos de avenidas e inundaciones durante la temporada de lluvias y con ello poder

realizar una gestión y planificación de cuencas en agricultura, estudios de impacto del cambio de uso de suelo etc. Para ello, se puede implementar el modelo HEC-HMS y realizar la simulación hidrológica que ha sido desarrollado para estimar hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas, para lo que se podrá conocer los caudales máximos y tiempos al pico, de acuerdo a las condiciones de precipitación y aplicando métodos de cálculo de hietogramas de diseño. (Yu & Zhang, 2023; Sahu, Shwetha y Dwarakish (2023; Guduru et al., 2023; Hamdan, Almuktar & Scholz 2021; Hussain, Wu & Yu, 2021; Zare et al, 2021; Angulo & Saavedra, 2018).

En el modelo se pueden implementar algunas metodologías de pérdida, y una de las más implementadas es el número de curva del servicio de conservación del suelo (SCS-CN)

Por lo tanto, las simulaciones numéricas de los procesos hidrológicos, son útiles e importantes para prevenir eventos hidrológicos que pudiesen afectar a los recursos naturales o las actividades antropológicas y como una herramienta que permite comprender los procesos, en los que se puede conocer el caudal. (Sánchez, 1974).

2.2.3 Literatura citada

- Ashaolu, E. D., Olorunfemi, J. F., & Ifabiyi, I. P. (2019). Effect of Land Use/Land Cover Change on Groundwater Recharge in Osun Drainage Basin, Nigeria. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 381–394.
- Abril Saltos, R. V., López Torres, A. C., & Reyes Mera, J. J. (2017). Influencia del dosel y sotobosque en pérdida de suelo por escorrentía en bosque de realce. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(2), 17-28.
- Andualet, T. G., Demeke, G. G., Ahmed, I., Dar, M. A., & Yibeltal, M. (2021). Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100917.
- Angulo, M. A., & Saavedra, O. C. (2018). modelación hidrológica de la cuenca maylanko utilizando hec-hms. *investigacion & desarrollo*, 18(1), 53–67.
- Abuhay, W., Gashaw, T., & Tsegaye, L. (2023). Assessing impacts of land use/land cover changes on the hydrology of Upper Gilgel Abbay watershed using the SWAT model. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12.
- Ashaolu, E. D., Olorunfemi, J. F., & Ifabiyi, I. P. (2019). Effect of Land Use/Land Cover Change on Groundwater Recharge in Osun Drainage Basin, Nigeria. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 381–394.

- Bayala, J., & Prieto, I. (2020). Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant and Soil*, 453, 17-28.
- Bettoni, M., Maerker, M., Bosino, A., Conedera, M., Simoncelli, L., & Vogel, S. (2023).
- Bosi, C., Pezzopane, J. R. M., & Sentelhas, P. C. (2020). Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. *Agroforestry Systems*, 94(2), 429–440.
- Blöschl, G. (Ed.). (2013). Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. *Cambridge University Press*.
- Comisión Nacional Forestal (2020) Estimación de la tasa de deforestación bruta en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo. Resumen ejecutivo. Jalisco, México.
- CONAGUA. (2019). Estadísticas del Agua en México.
- CONAGUA. (2023). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero ticolutla (3002), estado de Veracruz.
- Duran-Peralta, E., Acuayte-Valdes, E., Del, M., Acuayte-Valdes, C., Carlos Hernández-López, J., & Lorenzo López-Cruz, I. (2022). La modelación y simulación matemáticas: una herramienta para la protección de cultivos.
- Esse, C., Ríos, N., Saavedra, P., Fonseca, D., Encina-Montoya, F., Santander-Massa, R., De los Ríos-Escalante, P., Figueroa-Muñoz, G., López-Pérez, A., & Correa-Araneda, F. (2021). Effects of land use change on water availability and water efficiency in the temperate basins of south-central Chile. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8).
- García Ramírez, P., Alatorre Cejudo, L. C., & Bravo Peña, L. C. (2023). Modelos de escorrentía superficial en la última década. Una revisión bibliográfica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 7726–7750.
- Guduru, J. U., Jilo, N. B., Rabba, Z. A., & Namara, W. G. (2023). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki River watershed, rift valley basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 197, 104743.
- Hamdan, A. N. A., Almuktar, S., & Scholz, M. (2021). Rainfall-runoff modeling using the hec-hms model for the al-adhaim river catchment, northern iraq. *Hydrology*, 8(2).
- Han, D., Currell, M. J., Cao, G., & Hall, B. (2017). Alterations to groundwater recharge due to anthropogenic landscape change. *Journal of Hydrology*, 554, 545–557.
- Hussain, F., Wu, R. S., & Yu, K. C. (2021). Application of physically based semi-distributed HEC-HMS model for flow simulation in tributary catchments of Kaohsiung area Taiwan. *Journal of Marine Science and Technology*, 29(1), 4.
- INEGI 2021, (20 de junio 2023). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Recuperado el 20 de junio de 2023. : <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>

- Janeth Béjar-Pulido, I. C.-S. S., & Inés Yáñez-Díaz Erik Orlando Luna-Robles, M. (2021). Evaluación y predicción de la infiltración en un Andosol bajo diferentes usos de suelo.
- Kalédjé, P. S. K., Ndam Ngoupayou, J. R., Rakotondrabe, F., & Mvondo Ondo, J. (2020). Quantitative assessment of water resources by the method of the hydrological balance in the Kadey catchment area (East-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development*, 10.
- Lan, Z., Zhao, Y., Zhang, J., Jiao, R., Khan, M. N., Sial, T. A., & Si, B. (2021). Long-term vegetation restoration increases deep soil carbon storage in the Northern Loess Plateau. *Scientific Reports*, 11(1).
- Lei, C., Wagner, P. D., & Fohrer, N. (2022). Influences of land use changes on the dynamics of water quantity and quality in the German lowland catchment of the Stör. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 2561–2582.
- Li, L., Yang, Y., Cui, T., Li, R., & Zheng, H. (2023). Land Use, Climate, and Socioeconomic Factors Determine the Variation in Hydrologic-Related Ecosystem Services in the Ecological Conservation Zone, Beijing, China. *Water (Switzerland)*, 15(11).
- Liu, Y., Zhao, L., Liu, Y., Huang, Z., Shi, J., Wang, Y., Ma, Y., Esteban Lucas-Borja, M., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2022). Restoration of a hillslope grassland with an ecological grass species (*Elymus tangutorum*) favors rainfall interception and water infiltration and reduces soil loss on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 219.
- Nguyen, T. T., Grote, U., Neubacher, F., Do, M. H., & Paudel, G. P. (2023). Security risks from climate change and environmental degradation: implications for sustainable land use transformation in the Global South. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 63, 101322.
- MacAlister, C. B. G. P. D. Q. M. T. L. S. V., Esteves, J., & Water Security, G. (2023).
- Matali, N. S., Rahman, E. K. A., & Ratnayake, U. (2023, January). Effects of root developments and vegetation cover on soil water infiltration. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2643, No. 1). AIP Publishing.
- Mace, R. E. (2023). Groundwater Sustainability Conception, Development, and Application palgrave studies in environmental sustainability.
- Mongil-Manso, J., Navarro-Hevia, J., & San Martín, R. (2022). Impact of Land Use Change and Afforestation on Soil Properties in a Mediterranean Mountain Area of Central Spain. *Land*, 11(7).
- Mengistu, T. D., Chung, I. M., Kim, M. G., Chang, S. W., & Lee, J. E. (2022). Impacts and Implications of Land Use Land Cover Dynamics on Groundwater Recharge and Surface Runoff in East African Watershed. *Water (Switzerland)*, 14(13).
- 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).

- Mosbahi, M., Kassouk, Z., Benabdallah, S., Aouissi, J., Arbi, R., Mrad, M., Blake, R., Norouzi, H., & Béjaoui, B. (2023). Modeling Hydrological Responses to Land Use Change in Sejnane Watershed, Northern Tunisia. *Water (Switzerland)*, 15(9).
- Nag, S., Roy, M. B., & Roy, P. K. (2022). Study on the functionality of land use land cover over the evaluation of groundwater potential zone: A fuzzy AHP based approach. *Journal of Earth System Science*, 131(3).
- Natural Resources Conservation Service -United State Department Agriculture (NRCS-USDA). (Julio de 2004). National Engineering Handbook Hydrology Part 630_Chapter 9. Recuperado el 5 de diciembre de 2023. <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch9.pdf>
- Nyembo, L. O., Larbi, I., Mwabumba, M., Selemani, J. R., Dotse, S. Q., Limantol, A. M., & Bessah, E. (2022). Impact of climate change on groundwater recharge in the lake Manyara catchment, Tanzania. *Scientific African*, 15.
- NOM-015-SEMARNAT/AGRICULTURA-20232. 2023 Recuperado 20 de junio de 2023 : https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5710189&fecha=01/12/2023#gsc.tab=0
- Oscar Matus, Jorge Faustino, Francisco Jiménez. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del Río Jucuapa, Nicaragua. Turrialba, C.R.: Asdi; CATIE. (38).
- Ortiz-Oliveros, H. B., Ávila-Pérez, P., Cruz-González, D., Villalva-Hernández, A., Lara-Almazán, N., & Torres-García, I. (2022). Climatic and hydrological variations caused by Land Use/Land Cover changes in the valley of Toluca, Mexico: *A rapid assessment. Sustainable Cities and Society*, 85.
- Rezaei, A., & Mohammadi, Z. (2017). Annual safe groundwater yield in a semiarid basin using combination of water balance equation and water table fluctuation. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 241–248.
- Ruíz-García, V. H., Borja de la Rosa, M. A., Gómez-Díaz, J. D., Asensio-Grima, C., Matías-Ramos, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2022). Forest Fires, Land Use Changes and Their Impact on Hydrological Balance in Temperate Forests of Central Mexico. *Water (Switzerland)*, 14(3).
- Sahu, M. K., Shwetha, H. R., & Dwarakish, G. S. (2023). State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(3), 3029-3051.
- Sajjad, M. M., Wang, J., Abbas, H., Ullah, I., Khan, R., & Ali, F. (2022). Impact of Climate and Land-Use Change on Groundwater Resources, *Study of Faisalabad District, Pakistan. Atmosphere*, 13(7).
- Salem, A., Abduljaleel, Y., Dezső, J., & Lóczy, D. (2023). Integrated assessment of the impact of land use changes on groundwater recharge and groundwater level in the Drava floodplain, Hungary. *Scientific Reports*, 13(1).

- Shrestha, G., Shakya, B. M., Shrestha, M. B., & Khadka, U. R. (2023). Water infiltration rate in the Kathmandu Valley of Nepal amidst present urbanization and land-use change. *H2Open Journal*, 6(1), 1–14.
- 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
- Siddik, M. S., Tulip, S. S., Rahman, A., Islam, M. N., Haghighi, A. T., & Mustafa, S. M. (2022) The impact of land use and land cover change on groundwater recharge in Northwestern Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, 315.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1974). Methods for water balance computations.
- P. Udawatta R, Rankoth L, Jose S. Agroforestry and Biodiversity. *Sustainability*. 2019; 11(10):2879.
- Spillias, S., Valin, H., Batka, M., Sperling, F., Havlík, P., Leclère, D., ... & McDonald-Madden, E. (2023). Reducing global land-use pressures with seaweed farming. *Nature Sustainability*, 6(4), 380-390.
- Stadtmüller, T. (1994). Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales, medidas para mitigarlo: una revisión bibliográfica.
- Udawatta, R. P., & Gantzer, C. J. (2022). Soil and water ecosystem services of agroforestry. *journal of soil and water conservation feature*, 77(1).
- Wang, Y., Rao, Y., & Zhu, H. (2023). Analyzing the Land Use and Cover Change Inside and Outside China's Ecological Function Area. *Land*, 12(7).
- Wang, H., Zhu, X., Zakari, S., Chen, C., Liu, W., & Jiang, X. J. (2022). Assessing the Effects of Plant Roots on Soil Water Infiltration Using Dyes and Hydrus-1D. *Forests*, 13(7).
- Xiao, F., Wang, X., & Fu, C. (2023). Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47.
- Yu, X., & Zhang, J. (2023). The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Flood Simulation under the Condition of River Basin Urbanization. *Water (Switzerland)*, 15(12).
- Zare, M., Pakparvar, M., Jamshidi, S., Bazrafshan, O., & Ghahari, G. (2021). Optimizing the runoff estimation with HEC-HMS model using spatial evapotranspiration by the SEBS model. *Water Resources Management*, 35(8), 2633-2648.
- Zhang, Y. wang, Wang, K. bo, Wang, J., Liu, C., & Shangguan, Z. ping. (2021). Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*, 11(1).
- Zhu, P., Zhang, G., Wang, C., Chen, S., & Wan, Y. (2023). Variation in soil infiltration properties under different land use/cover in the black soil region of Northeast China. *International Soil and Water Conservation Research*.

3. INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO EN LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS

3.1. Resumen

En México se han hecho balances de agua a nivel regional para conocer la recarga de los acuíferos, pero se carece de estudios locales que contemplen el efecto de los diferentes tipos y usos de suelo y las características topográficas. Por tal motivo, en el presente estudio se planteó como objetivo estimar la recarga potencial del acuífero Tecolutla en cuatro microcuencas con usos silvopastoril (SP), reforestación de bambú (RB), plantación de bambú (PB) y selva alta perennifolia (SAP) como testigo, mediante un balance de agua con información medida de lluvia y escorrentía superficial en 2023. La recarga potencial, porcentual respecto a la lámina precipitada, para el evento de lluvia del 23-24 de abril con 301.6 mm de precipitación fue de 84.15% en SP, 72.68% en RB; para el evento del 25 de agosto, con una precipitación de 45.0 mm, la recarga fue de 43.5% en SP, 39.82% en PB y 36.6% en SAP; y el 9 de septiembre, con una lámina precipitada de 39 mm, generó una recarga de 35.9% en SP. El sistema de mayor recarga fue SP, atribuible a su relieve plano y depresiones topográficas en la mayor parte de la microcuenca; con mayor recarga a mayor duración e intensidad de la lluvia. El segundo sitio con mayor recarga fue RB por su tipo de suelo, corta red de drenaje duración e intensidad de la lluvia. En SAP se obtuvo la menor recarga, debido a que, gran parte de la superficie de la microcuenca tiene pendientes fuertes y una red drenaje superficial más ramificada y de mayor longitud que las demás. Las recargas de los sistemas analizados son altos, pero no se observaron valores mayores en aquellos con menores alteraciones en la vegetación natural, porque depende de la topografía, relieve, tipo de suelo, características de la lluvia y de la red de drenaje.

Palabras clave: acuífero, escorrentía, cobertura y uso de suelo, microcuenca.

Tesis de maestría en Agroforestería, Posgrado en Agroforestería para el desarrollo sostenible, Universidad Autónoma, Chapingo.

Autor: Dalinda Ramírez Sánchez

Director Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

INFLUENCE OF VEGETATION COVER AND LAND USE ON THE POTENTIAL RECHARGE OF AQUIFERS

3.2. Abstract

In Mexico, regional water balances have been carried out to determine aquifer recharge, but there is a lack of local studies that consider the effect of different types and uses of soil and topographic characteristics. For this reason, the aim of this study was to estimate the potential recharge of the Tecolutla aquifer in four micro-watersheds with silvopastoral (SP), bamboo reforestation (RB), bamboo plantation (PB) and high evergreen forest (SAP) as a control, by means of a water balance with measured rainfall and surface runoff information in 2023. The potential recharge, as a percentage of precipitation, for the rainfall event of April 23-24 with 301.6 mm of precipitation was 84.15% in SP, 72.68% in RB; for the event of August 25, with a precipitation of 45.0 mm, the recharge was 43.5% in SP, 39.82% in PB and 36.6% in SAP; and September 9, with a precipitation of 39 mm, generated a recharge of 35.9% in SP. The system with the greatest recharge was SP, attributable to its flat relief and topographic depressions in most of the microbasin; with greater recharge with greater duration and intensity of rainfall. The second site with the highest recharge was RB due to its soil type, short drainage network, duration and rainfall intensity. SAP had the lowest recharge, due to the fact that a large part of the surface of the microbasin has steep slopes and a surface drainage network that is more branched and longer than the others. Recharges of the systems analyzed are high, but higher values were not observed in those with less alterations in the natural vegetation, because it depends on the topography, relief, soil type, rainfall characteristics and drainage network

Keywords: Aquifer, runoff, land cover and land use, micro-watersheds.

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

Author: Dalinda Ramírez Sánchez.

Advisor: Dr. Jorge Víctor Jorge Hernández

3.3. INTRODUCCIÓN

El cambio de la cobertura y uso de suelo ha ocasionado la merma de las superficies potenciales para la infiltración y recarga de acuíferos (Shrestha et al., 2023). Ocasionando un impacto negativo en la hidrología de las cuencas (Mekonnen & Manderso, 2023), como es en los escurrimientos superficiales (Bettoni et al., 2023), en el flujo base de estos, en la humedad del suelo (Ruíz-García et al., 2022), en la evapotranspiración (Ortiz-Oliveros et al., 2022), entre otros. El cambio de uso de suelo ocasionado por tala de áreas forestales es una actividad que disminuye 212,070 ha al año del periodo 2001-2018 (Conafor, 2020) a nivel nacional, cediendo al uso agrícola y/o ganadero (FAO, 2023). Siendo las áreas arboladas las que captan mayor cantidad de agua durante la lluvia, además su follaje permite conservar mayor humedad en el suelo (Bosi et al., 2020), aumentan la tasa de infiltración (Liu et al., 2022) y las raíces al mejorar las condiciones del suelo, reducen la escorrentía. (Matali, Rahman & Ratnayake, 2023). Comprobándose que las áreas forestales aumentan la producción de agua. (Li et al., 2023).

Ante la reducción de áreas potenciales para la captación de agua, se han implementado varios métodos directos e indirectos para estimar la recarga de acuíferos, en diferentes usos de suelo, algunos de ellos implementan un balance de aguas en cuencas grandes a partir de datos de entrada y salida como es la precipitación, evapotranspiración, infiltración y escurrimientos superficiales (Salem et al., 2023; Zhang et al., 2021; Kalédjé et al., 2020; Rezaei & Mohammadi, 2017; Schosinsky, 2006), ante la importancia de la cobertura arbórea se considera la retención por follaje propuesta por Corbett and Crouse (1968) y por Bruijnzeel (1990).

Para el presente artículo se tiene como objetivo estimar la recarga potencial de acuíferos en diferentes tipos de cobertura y usos de suelo mediante un balance de agua que permitan elegir los de mayor recarga. De esta forma se pretende dejar el antecedente cuantitativo de los hidrogramas que se generan en el área de estudio en diferentes tipos de cobertura y uso de suelo y su recarga potencial.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Sitio de estudio

El área de estudio se ubica en el municipio de Hueytamalco, al Noreste del Estado de Puebla entre los paralelos 19°52' y 20°12' de latitud norte; los meridianos 97°12' y 97°23' de longitud oeste; altitud entre 100 y 1900 msnm (figura 1). Colinda al norte con el municipio de Tenampulco, al este con el municipio de Acateno, al sur con el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave y de los municipios de Xiutetelco y Teziutlán; al oeste con los municipios de Teziutlán, Hueyapan y Ayotoxco de Guerrero. El clima de acuerdo los criterios de Köppen y E. García es semicálido húmedo con lluvias todo el año. El rango de la precipitación media está entre 1500 mm a 2500 mm la media anual es de 2683.6 mm y el de temperatura entre 16 y 26°C, con una temperatura media anual de 21.5°C Se trata de un área geológica con rocas de tipo sedimentaria, tipo lutita-Arenisca To(lu-ar) de la era Cenozoica, en el área de estudio no hay fallas geológicas (INEGI, 2010). El Relieve corresponde a llanura aluvial con lomerío. Hidrogeológicamente el área de estudio es de permeabilidad baja a alta, del terciario marino, lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados. (CONAGUA, 2020).

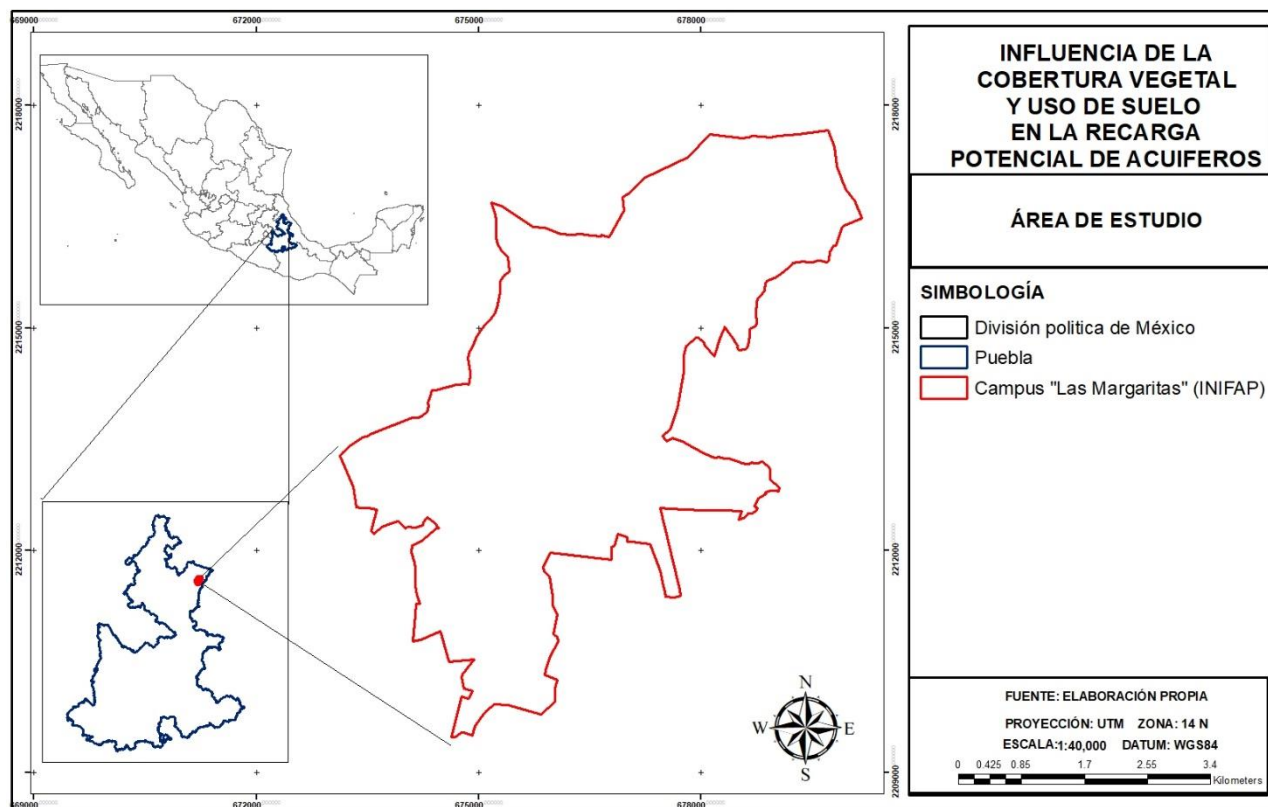


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.

3.4.2. Cuencas de estudio

Para la primera etapa se implementó SIG (Sistemas de información geográfica) por medio del software ArcGis 10.8 implementado para ubicar el área de estudio y conocer las características climáticas, topográficas, geológicas, de relieve, tipos de suelo e hidrología del lugar, para lo cual se utilizaron capas vectoriales del INEGI (2021) escala 1:250,000, también se obtuvo el Modelo digital de elevaciones del sitio oficial de Alaska Satellite Facility, Data search Vertex con una resolución de 12.5 m, para conocer la pendiente de las microcuencas, delimitar las microcuencas por medio de las herramientas de cálculo de dirección de flujo, acumulación de flujo, para posteriormente definir las corrientes de acuerdo al valor del MDE y condicionar la clasificación de las celdas con acumulación de flujo para obtener la red de drenaje, la cual se procede a definir como líneas. Posteriormente se crea un shapefile- de punto en el sitio de aforo

que es el área de salida de las corrientes superficiales y para finalizar con la herramienta de cuenca se define la microcuenca, que se debe convertir de raster a shapefile.

Una vez que se ubicó y proyectó a UTM en zona 14 el área del proyecto, se recortó el modelo digital de elevación con la capa vectorial correspondiente al predio del campo experimental INIFAP “Las Margaritas”, con la finalidad de obtener la capa de las corrientes superficiales con la herramienta Hydrology de ArcGis y cotejarlas con la capa vectorial del INEGI de hidrología para ubicar las corrientes superficiales. Para elegir los sitios de estudio, se interpusieron las capas vectoriales de uso de suelo del INEGI (2021), hidrología, las delimitaciones de uso brindadas por el INIFAP, campo experimental “Las margaritas” obteniendo las posibles microcuencas y con ello se propusieron los sitios de aforo. Posteriormente se cotejaron mediante recorridos de campo y corrección en gabinete, seleccionando microcuencas con distintos usos de suelo y cobertura, correspondientes a: sistema silvopastoril, área reforestada con Bambú, plantación de Bambú y un área testigo de Vegetación arbórea de Selva alta perennifolia (figura 2).

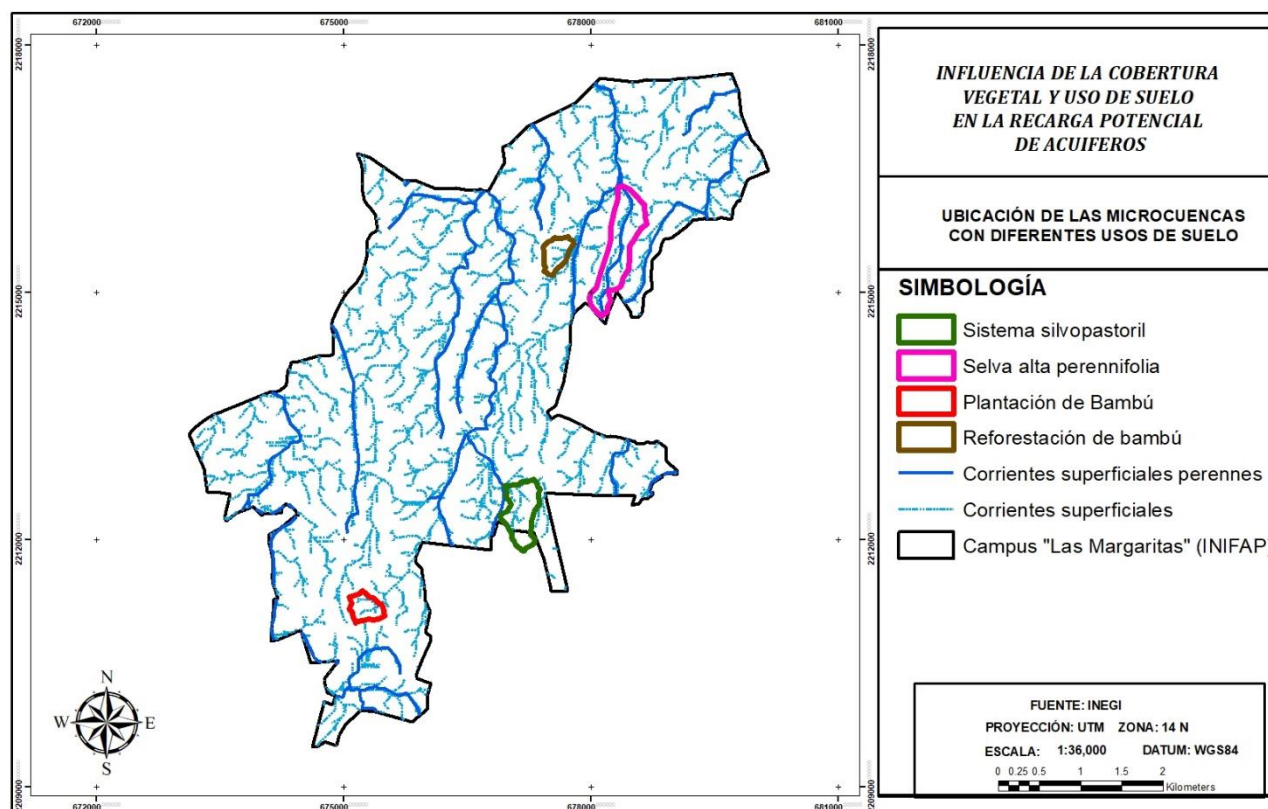


Figura 2. Ubicación de las Microcuencas dentro del predio del Campo Experimental del INIFAP “Las Margaritas”.

La microcuenca que tiene como uso productivo el sistema silvopastoril se ubica en la zona sureste del INIFAP campo experimental “Las margaritas” abarcando una superficie de 25.54 ha tiene un perímetro de 2,378.9 m, con suelos de tipo feozem-áplico. La microcuenca con uso actual de reforestación de bambú se ubica en la zona noreste, tiene un área de 11 ha, un perímetro de 1,367 m con suelos de tipo regosol eutrico. La microcuenca donde se tiene plantación de Bambú está al sur del predio, abarca una superficie de 10.94 ha, tiene un perímetro de 1,341.21 m, con suelos de tipo regosol eutrico. La microcuenca seleccionada como “área testigo” correspondiente a un sitio conservado que presenta vegetación arbórea de Selva alta perennifolia, se ubica en la zona noreste con un área de 43.90 ha, tiene un perímetro de 3,711.39 m y presenta suelos de tipo regosol eutrico (INEGI, 2014) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de las microcuencas delimitadas.

Microcuenca	Área (ha)	Perímetro (m)	Pendiente promedio (%)	Uso de suelo	Tipo de suelo	Textura	Longitud de la corriente principal (m)	Pendiente promedio del cauce principal (%)
sSilvopastoril	25.54	2,378.90	8	Pastizal	Feozem áaplico	Franco arenoso	667.0	8.2
Reforestación	11.00	1,367.00	25	Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia y bambú	Regosol eutríco	Franco arcillo arenoso	476.0	14.5
Plantación	10.94	1,341.21	23	Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia y bambú	Regosol eutríco	Franco arenoso	516.0	13.8
Selva alta perennifolia	43.90	3,711.39	21	Selva alta perennifolia	Regosol eutríco	Franco arenoso	1,789.0	4.0

Usos de suelo

Para el estudio se identificó dentro del campo experimental del INIFAP “Las margaritas” cuatro microcuencas con diferentes usos de suelo, correspondientes a: sistema Silvopastoril (SP), Reforestación con bambú (RB), plantación de bambú (PB) y selva alta perennifolia (SAP).

En la figura 3 se muestra el acercamiento de la microcuenca con el uso de sistema silvopastoril, donde se observa el bambú *Guadua aculeata* y árboles como: *Bursera simaruba*, *Ficus citrifolia*, *Cedrela odorata*, *Gliricidia sepium*, *Croton draco*, *Ficus obtusifolia*, (Castro, 2021) como cercos vivos y árboles dispersos, así como pastos que alimentan el ganado vacuno y equino del lugar. En la imagen se puede observar la vegetación conglomerada, las barreras vivas y las áreas de pastizales.

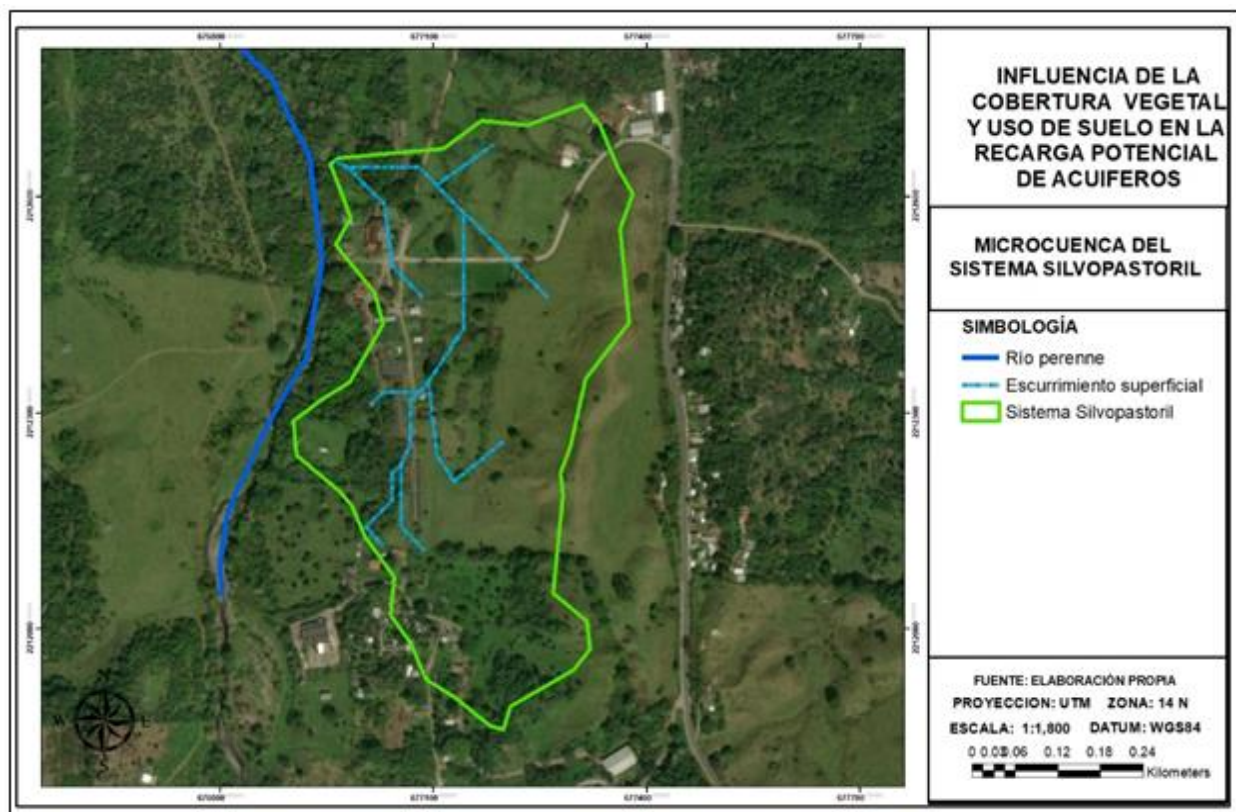


Figura 3. Uso de suelo del sistema agroforestal silvopastoril.

En la reforestación con bambú (figura 4) se observa la densa vegetación secundaria de selva alta perennifolia, que se encuentra fragmentada por parcelas de ganadería abandonadas, por lo que la vegetación se encuentra en regeneración, algunas de las especies que se pueden encontrar son: *Guadua aculeata*, *Ficus citrifolia*, *Bambu sp.*, *Quillaja saponaria* (Castro, 2021).

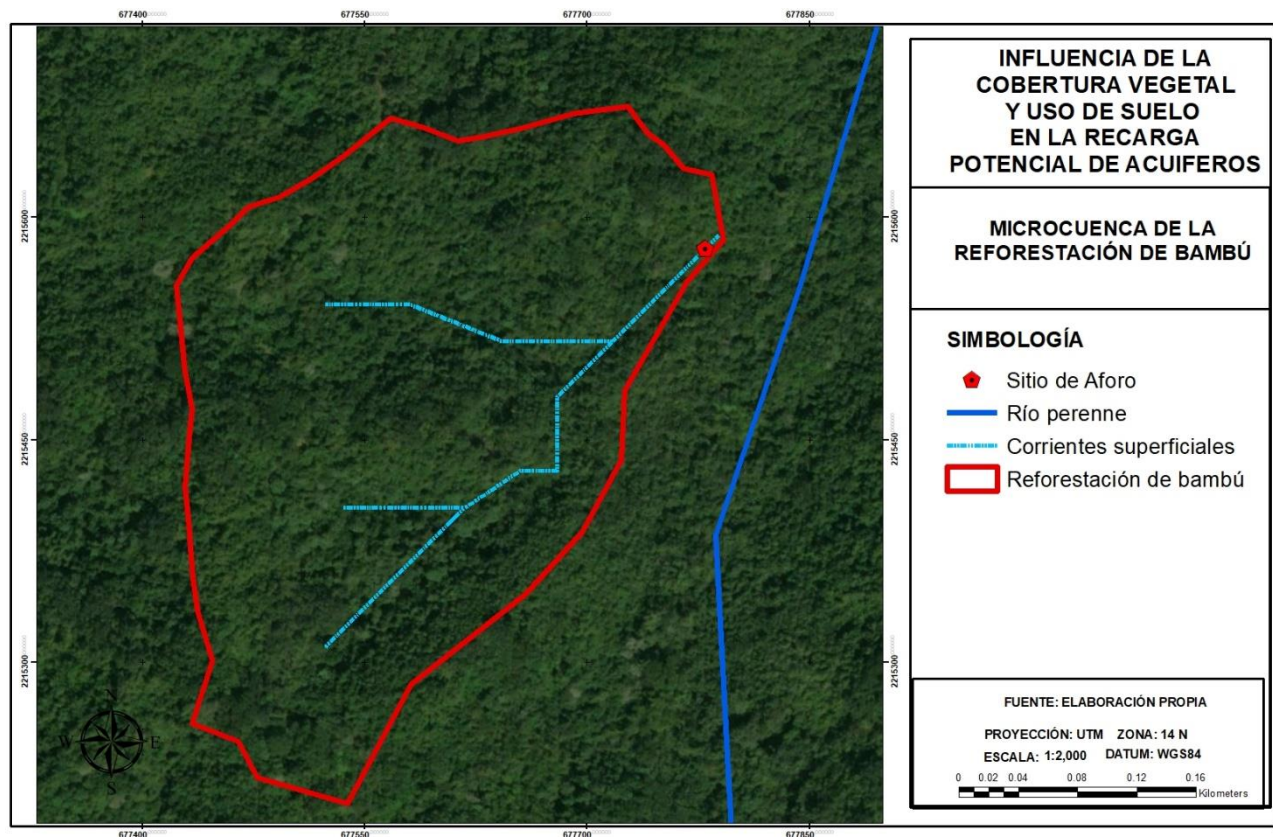


Figura 4. Uso de suelo del área de reforestación de bambú.

En la plantación de bambú (figura 5) se observa que existe vegetación secundaria notándose la fragmentación, ocasionada por el uso ganadero actualmente abandonado y el sitio se ha ido regenerando naturalmente por lo que se consideró en un proyecto para plantación con bambú en la mayor parte del área, *Guadua aculeata*, *Pterocarpus hayesii*, *Cecropia obtusifolia*, *Heliocarpus mexicanus*, *Matudaea trinervia*, *Cyathea divergens*. *Quercus rotundifolia* (Castro, 2021).

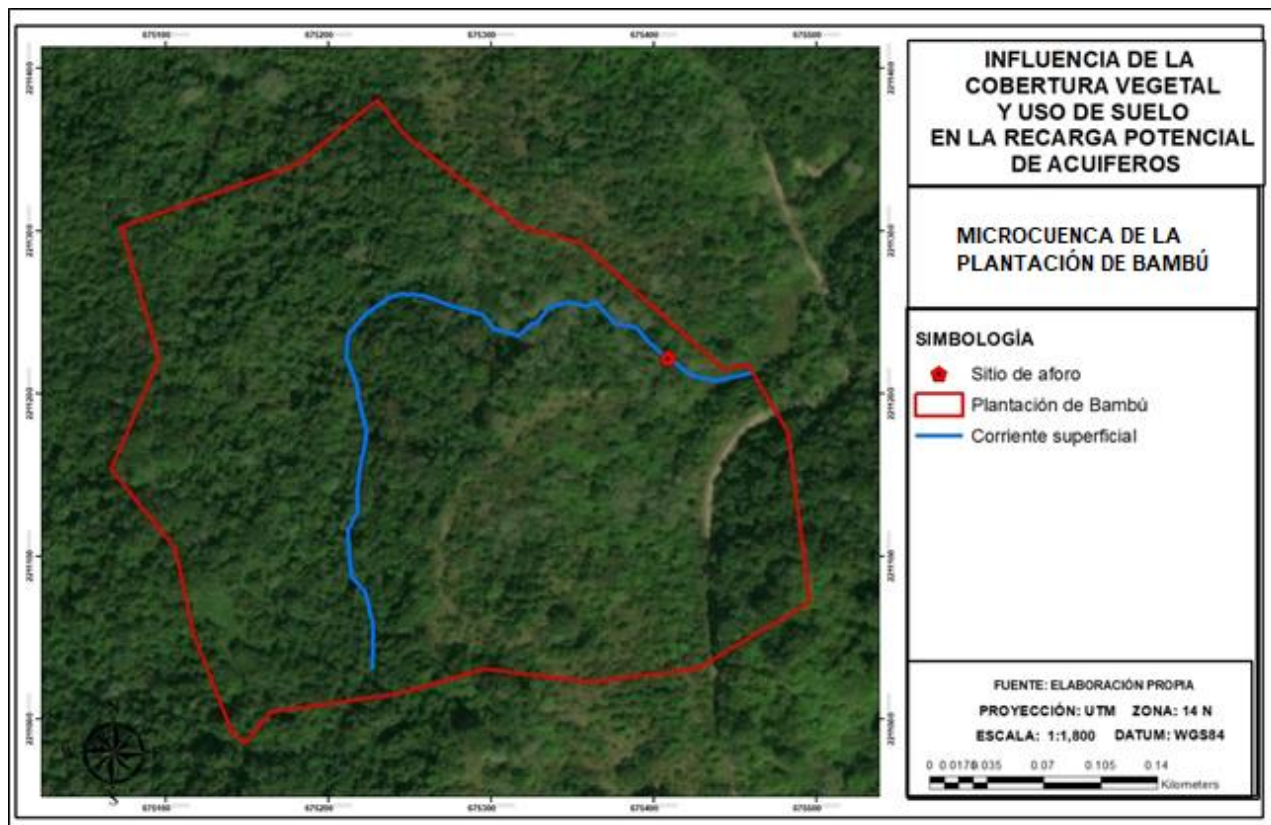


Figura 5. Uso de suelo del área de plantación de bambú.

Para poder tener una referencia de lo que debería ocurrir en un ecosistema natural de selva alta perennifolia se consideró un área testigo dentro del predio de las margaritas, en que se presentan especies como: *Guadua aculeata*, *Pterocarpus hayesii*, *Cecropia obtusifolia*, *Heliocarpus mexicanus*, *Matudaea trinervia*, *Cyathea divergens*, *quercus rotundifolia* (Castro, 2021).

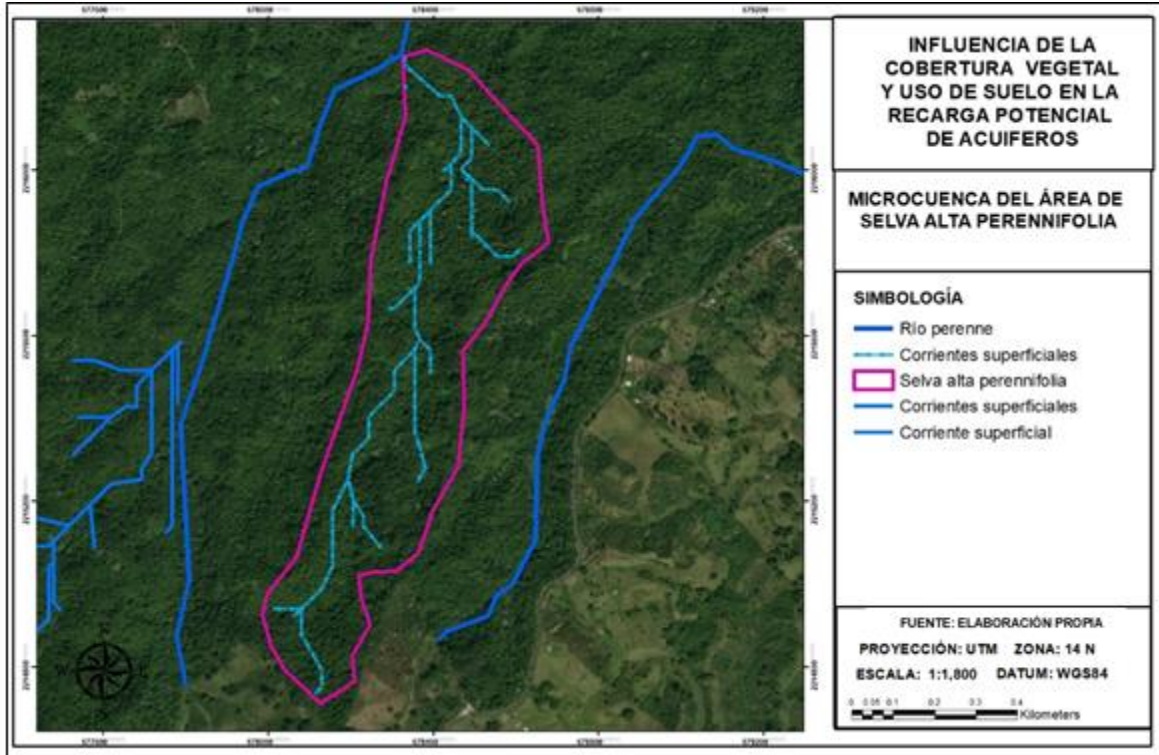


Figura 6. Uso de suelo del área “testigo” Selva alta perennifolia.

3.4.3. Recarga potencial del acuífero

La recarga potencial al acuífero se calculó mediante la comparación de la lámina infiltrada y la capacidad de retención de los suelos. La lámina infiltrada se calculó con la siguiente Ecuación de balance:

$$I = P - (Q + ET + RF) \quad (5)$$

Donde I es la infiltración (mm); Q es el escurrimiento superficial (mm); ET es la Evapotranspiración (mm); y RF es la retención por follaje (mm).

Si la lámina de infiltración es mayor que la capacidad de retención del suelo, entonces la diferencia entre sus valores será la recarga potencial al acuífero; de lo contrario la recarga potencial es nula.

La capacidad de retención del suelo (CRS) en milímetros se calcula con la siguiente Ecuación:

$$CRS = (\theta_{cc} - \theta_0) \times P_r \quad (6)$$

Donde: θ_{cc} es el contenido de humedad a capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_0 es el contenido de humedad inicial ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); P_r es la profundidad de raíz (mm).

La humedad inicial se consideró igual que la humedad a punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) dado que los eventos de escorrentía considerados fueron al inicio del periodo de lluvias. Para conocer los valores de los parámetros de las ecuaciones, se hizo la revisión de literatura y se cotejó en campo por medio del muestreo de suelo en los cuatro sitios de uso de suelo y cobertura y se determinó su textura por el método de bouyoucos en laboratorio. De acuerdo a la literatura, en el área de estudio se han registrado suelos de textura arcilloso, franco arcilloso y arenoso arcilloso, reportando un contenido de materia orgánica de 5.2% (Alarcón 2015 & Clavijo 2016). Sin embargo, de acuerdo al análisis de laboratorio se identificó un contenido de materia orgánica de 3.35 en el área silvopastoril y el contenido más bajo fue de 0.71% registro en el área testigo de selva alta perennifolia, lo cual está acorde con Leul et al., 2023.

Por otra parte, para conocer la densidad aparente se usó el método de la probeta y para el punto de marchitez permanente (pmp) y capacidad de campo (cc) se tomaron los sugeridos por (Saxton et al., 2006), se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de Materia orgánica, Punto de marchitez permanente y Capacidad de campo de los suelos de las microcuencas analizadas.

Microcuenca	Clase textural	Humedad inicial (Cm^3)	Materia orgánica (%)	Densidad aparente g cm^{-3}	Conductividad hidráulica saturada Mm h^{-1}	θ_{pmp} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
Silvopastoril	franco arenoso	0.4451	3.35	0.86	75.61	0.165	0.477
Reforestación	Franco arcillo arenoso	0.4699	2.06	0.78	10.11	0.271	0.432
Plantación	franco arenoso	0.4451	2.38	0.87	54.38	0.169	0.446

Microcuenca	Clase textural	Humedad inicial (Cm ³)	Materia orgánica (%)	Densidad aparente g cm ⁻³	Conductividad hidráulica saturada Mm h ⁻¹	θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)
Selva alta perennifolia	Franco arenoso	0.4250	0.71	0.98	28.95	0.171	0.399

3.4.4. Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se obtuvo mediante estaciones de aforo situadas en el cauce principal a la salida de las microcuencas, (Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10), en estas figuras se observan los mapas donde se presenta la pendiente, curvas de nivel y corrientes superficiales. Para definir el perfil de la corriente superficial del sitio de aforo, se consideró el posible evento máximo observable en campo.

En la figura 7 se muestra la microcuenca del uso correspondiente al sistema silvopastoril donde la pendiente promedio de la microcuenca es del 8%, presenta una corriente superficial principal que mide 667 m y el cauce principal tiene un 8.2% de pendiente. La sección transversal del sitio de aforo del área es de 0.534 m², un perímetro de mojado de 2.220 m, un tirante máximo de 0.64 m y un tirante medido de 0.604 m. el punto de aforo se ubicó al final de la corriente principal que reúne pequeños escurrimientos de tipo intermitente, que en conjunto alimentan a un río más grande ubicado aguas abajo más adelante del punto de medición. Dentro del predio se presenta un pequeño manantial que mantiene actualmente húmedo el suelo en la zona media de la microcuenca al ser pequeño se dispersa y proporciona agua al ganado.

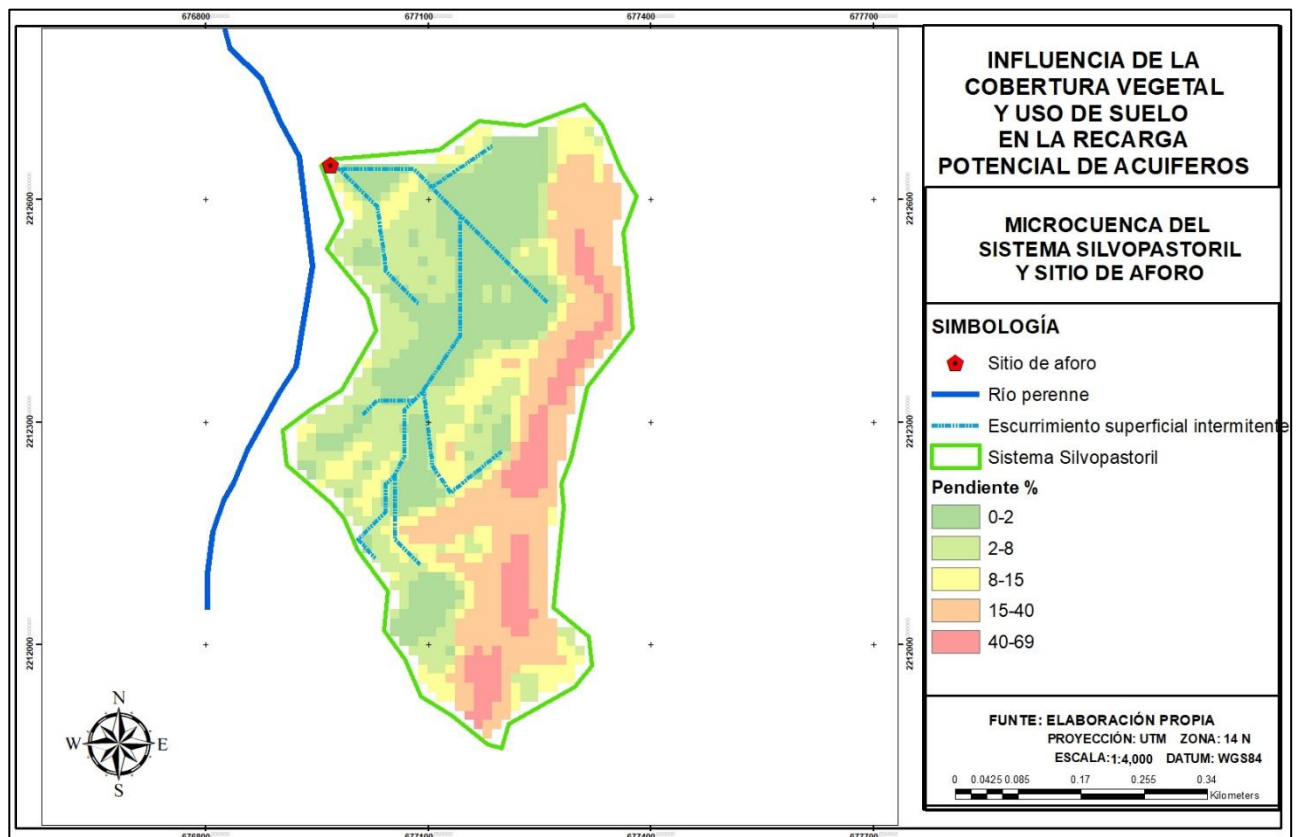


Figura 7. Microcuenca del sistema agroforestal silvopastoril.

En la figura 8. se muestra la microcuenca de reforestación de bambú donde la pendiente promedio de la microcuenca es del 25%, el cual está conformado por pequeñas corrientes superficiales que alimentan una pequeña corriente principal que mide 476 m, y la pendiente promedio del cauce es de 14.5%. Y el sitio de aforo se ubicó en la zona baja donde confluyen los escurrimientos superficiales que definen la microcuenca. La sección transversal del sitio de aforo del área de reforestación tiene un área de 13.441 m², un perímetro de mojado de 15.943 m, un tirante máximo de 1.672 m y un tirante medido de 1.670 m. Durante las mediciones se apreció un escurrimiento superficial base con una altura de 3 a 11 cm que se seca en temporadas muy secas, de acuerdo al recorrido realizado.

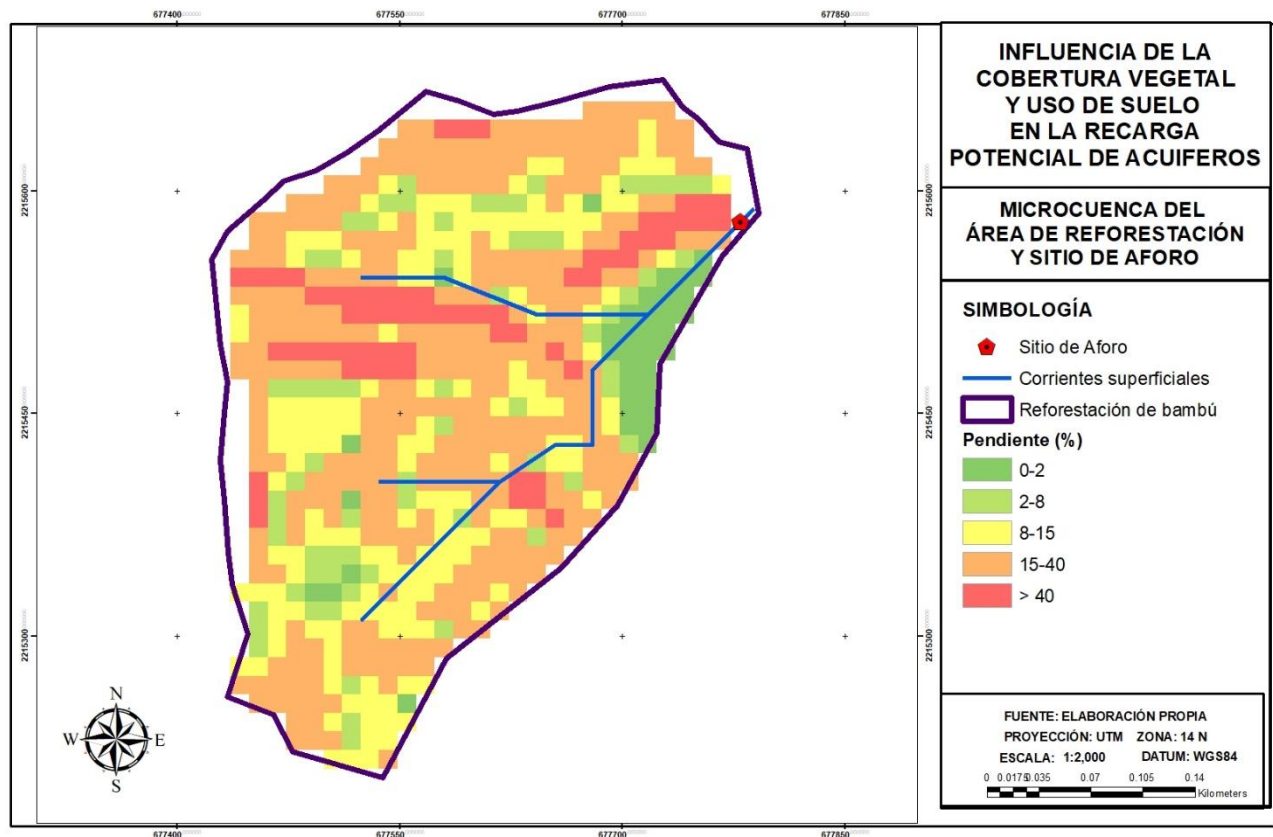


Figura 8. Microcuenca del área de reforestación.

La Microcuenca del área de plantación de Bambú (Figura 9) tiene una pendiente promedio de 23%, definido por varias corrientes superficiales y una principal pequeña que tiene una longitud de 516 m con un promedio de 23% de pendiente. El sitio de aforo se ubicó en el sitio de reunión de las corrientes superficiales. La sección transversal del sitio de aforo de plantación, tiene un área de 10.17 m², un perímetro de mojado de 19.8185 m, un tirante máximo de 1.930 m y un tirante medido de 0.604 m. Durante la mayor parte del año durante las visitas a campo se observó que la corriente principal tiene un flujo base con una altura de 4 a 7 centímetros de altura que se llega a secar en temporadas muy secas.

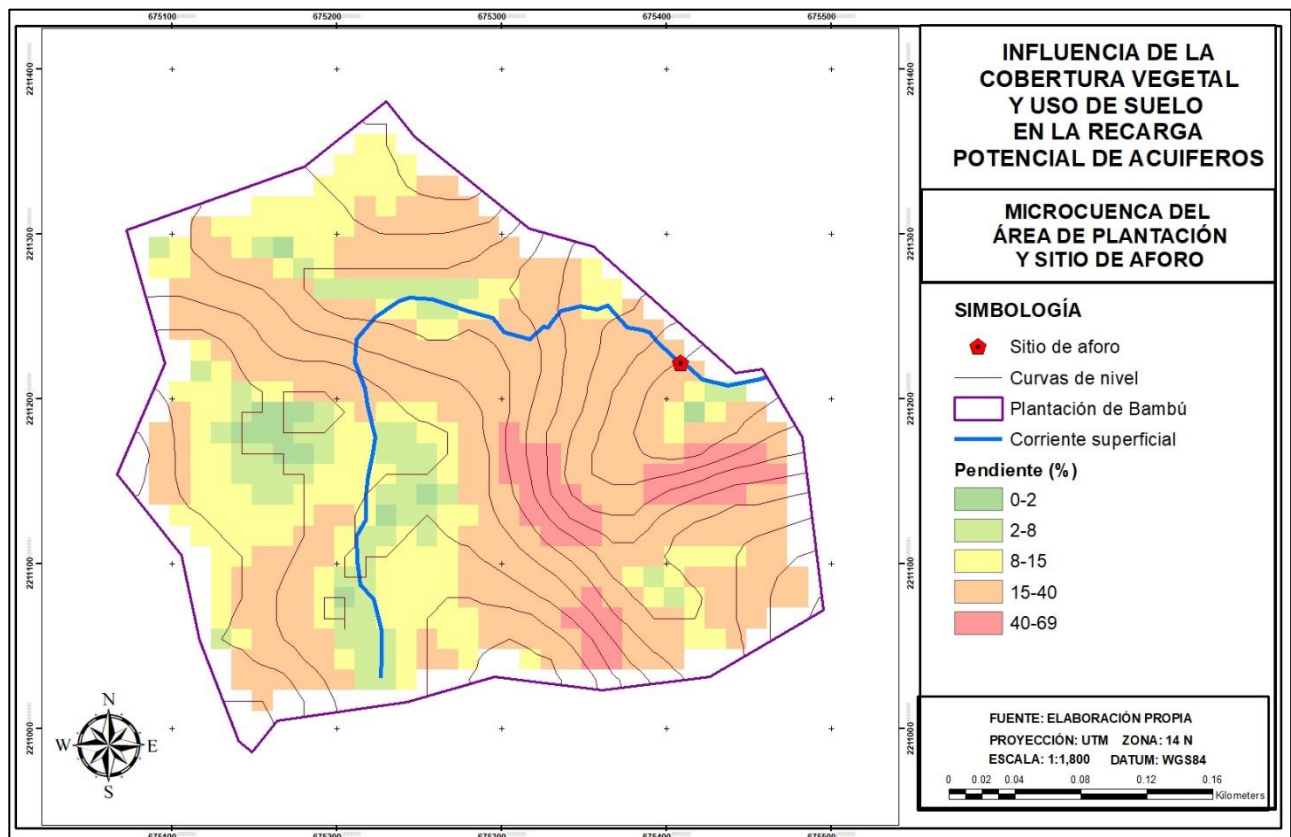


Figura 9. Microcuenca del área de plantación de Bambú.

La microcuenca testigo presenta vegetación de selva alta perennifolia (Figura 10), la pendiente promedio de la microcuenca es de 21%, conformado por varias corrientes pequeñas superficiales intermitentes y perennes que contribuyen a la corriente principal de tipo perenne cuyo cauce principal tiene una pendiente promedio del 4%. La sección transversal del sitio de aforo de la Selva alta perennifolia tiene un área de 3.259 m², un perímetro de mojado de 7.135 m, un tirante máximo de 1.054 m y un tirante medido de 1.049 m. En el sitio la corriente principal aforada presentó un escurrimiento superficial de tipo perenne en el que se estuvo midiendo una altura de caudal de entre 14 y 12 cm de altura.

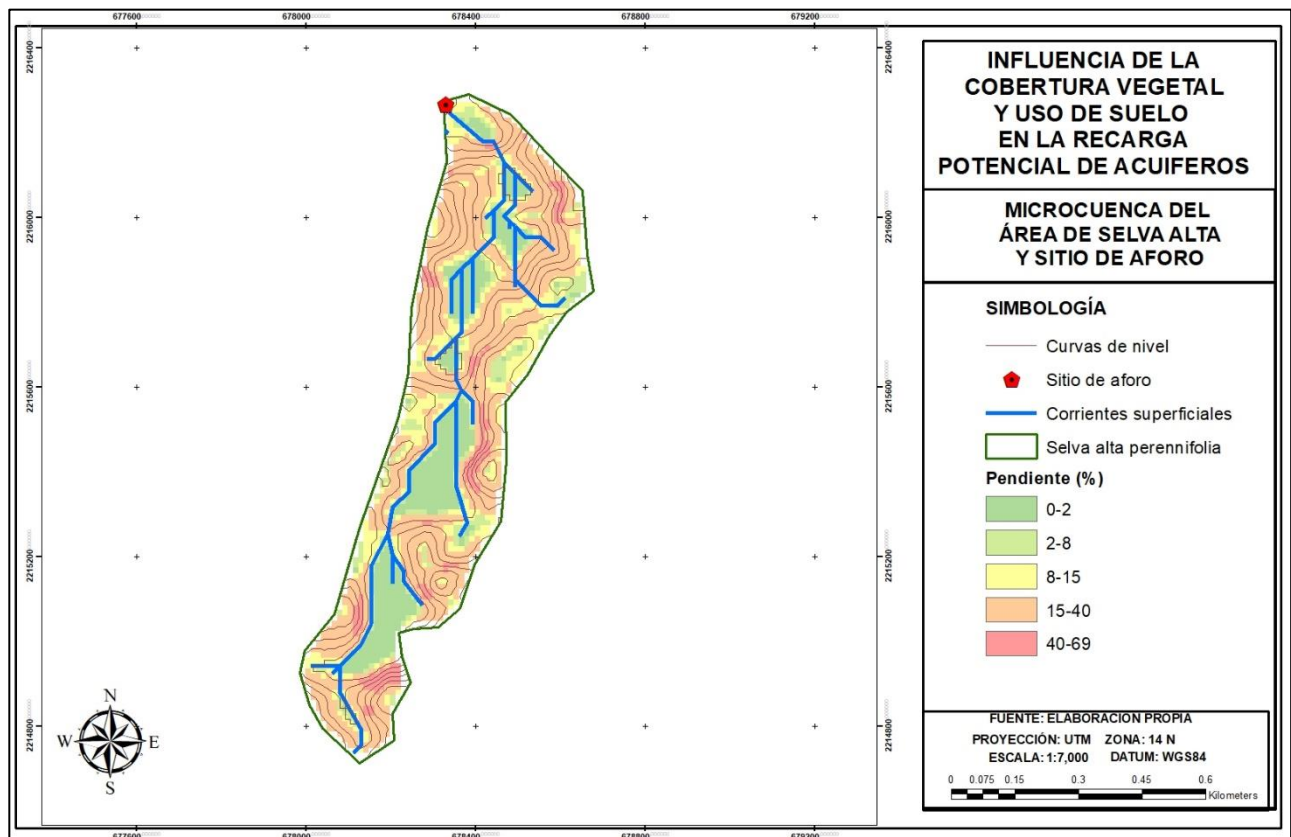


Figura 10. Microcuenca del sitio testigo de Selva alta perennifolia.

El caudal se obtuvo con ecuaciones de calibración caudal–tirante, las cuales se generaron a partir del método sección-velocidad. La sección transversal y la pendiente del fondo del cauce de los sitios de aforo se obtuvo con un equipo topográfico (Figura 11). La velocidad media del flujo se obtuvo con la ecuación de Manning y su coeficiente de fricción se asignó el valor sugerido por Ven Te Chow (1994) de acuerdo a las condiciones físicas de las paredes del cauce. Las ecuaciones de calibración de cada uno de los sitios se muestran en las figuras 12, 13, 14 y 15.

Los hidrogramas de esorrentía generados por los eventos de precipitación se obtuvieron ingresando los tirantes en las ecuaciones de calibración correspondientes. Los tirantes se obtuvieron con estaciones automatizadas, integradas por un sensor de presión o ultrasónico, una placa arduino Uno, tarjeta micro-SD para guardar información, reloj para sincronizar la fecha y hora de las lecturas, baterías para almacenar y alimentar el equipo en horas sin luz solar y con un panel solar (Figura 16). los equipos de medición se

probaron y calibraron previo a su instalación en el sitio de aforo y en algunos casos se recalibraron en el sitio de instalación. En la figura 17 se observan los sitios de aforo con el equipo de medición instalado, en el que se observa que en el sistema silvopastoril no lleva un flujo de agua, no obstante, en la plantación de bambú, reforestación de bambú y selva alta perennifolia llevan un flujo base.



Figura 11. Fotografías de los sitios de aforo del a) Sistema agroforestal Silvopastoril, b) Reforestación, c) d) Selva alta perennifolia.

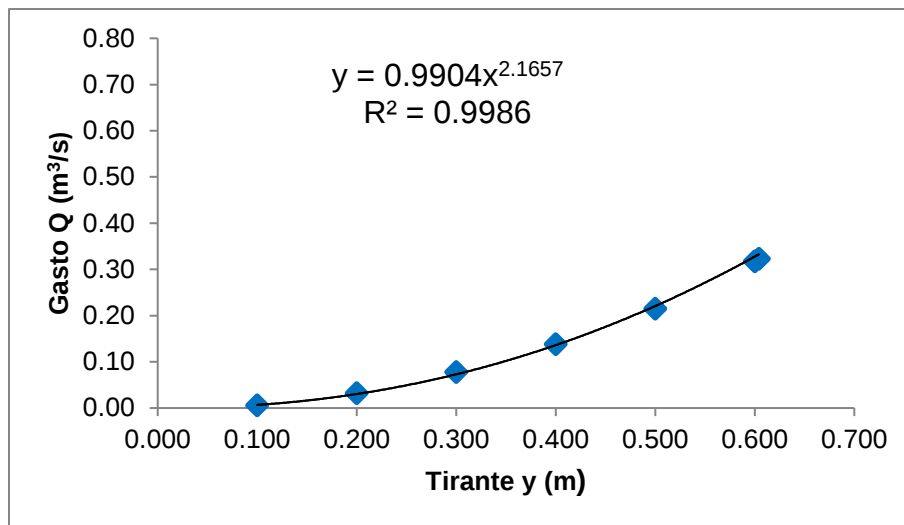


Figura 12. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área del sistema silvopastoril.

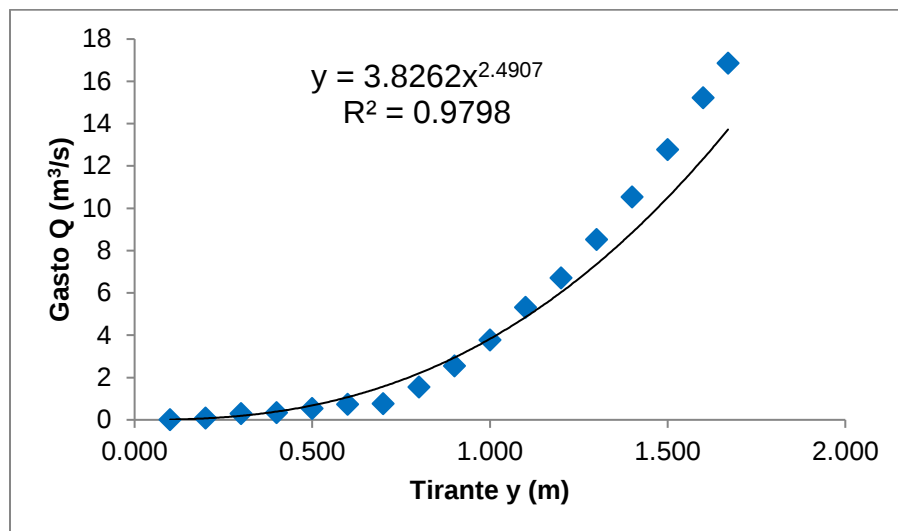


Figura 13. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de reforestación.

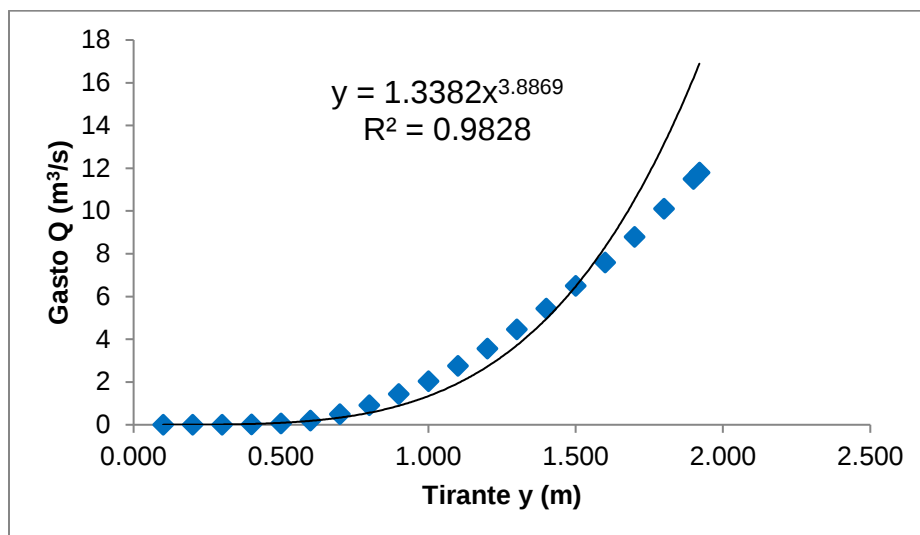


Figura 14. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de plantación de bambú.

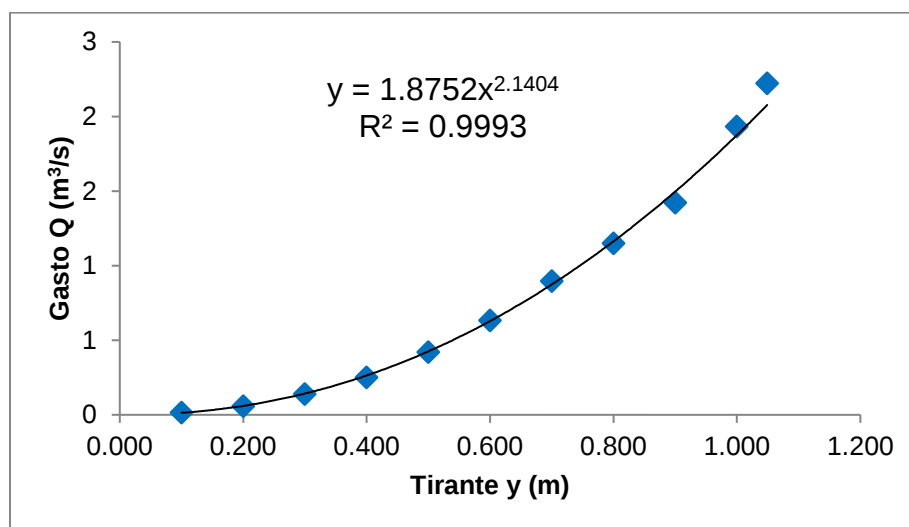


Figura 15. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de Selva alta perennifolia.

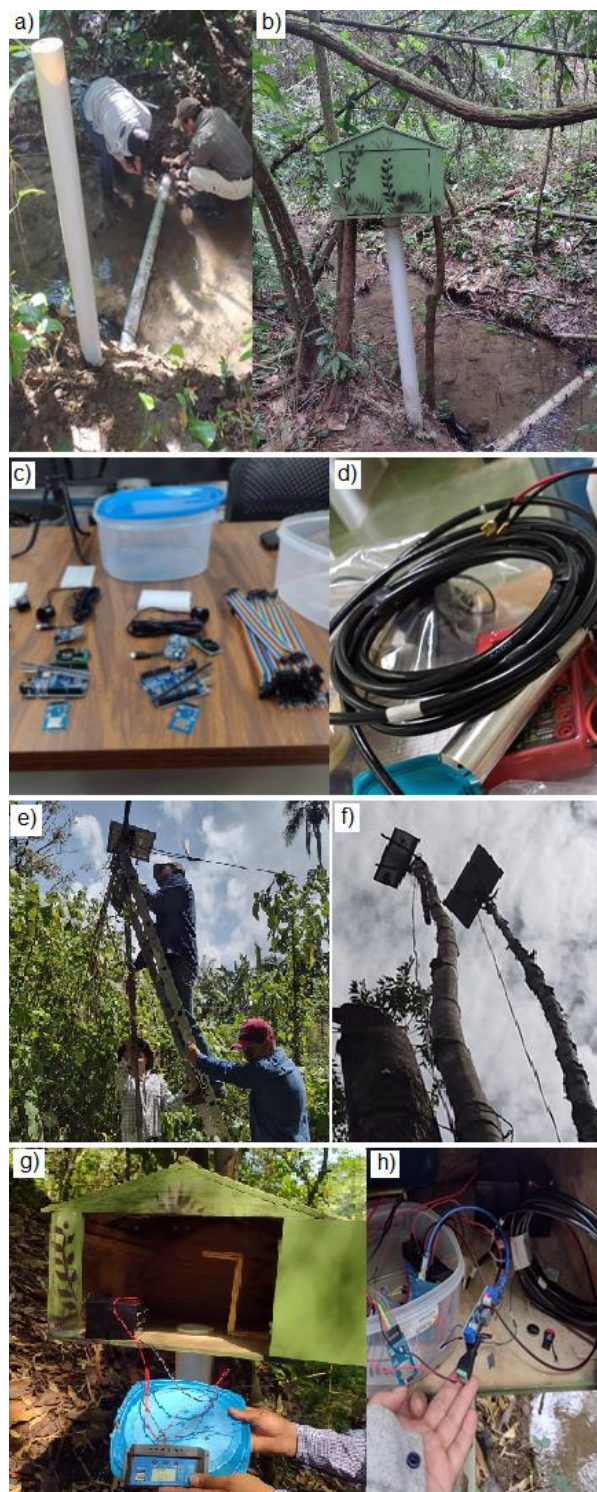


Figura 16. Equipo de medición (a) instalación de tubos de pvc; b) instalación de caseta; c) sensor ultrasónico; d) sensor de presión; e) instalación de panel solar; f) paneles solares; g) batería con equipo ultrasónico; h) equipo con sensor de presión.



Figura 17. Fotografías de los sitios de aforo de: a) Sistema Silvopastoril, b) Reforestación, c) plantación forestal y d) Selva alta perennifolia.

3.4.5. Precipitación

Para obtener datos de precipitación se instaló un pluviómetro Davis® (Figura 18) automatizado, con una precisión de $\pm 4\%$, con una resolución de 0.2 mm, ubicado en un lugar que es representativo de las cuatro microcuencas de estudio, en el mes de febrero de 2023 y registrar la evolución temporal de la precipitación a cada minuto.



Figura 18. Pluviómetro Davis® automatizado.

La estación automatizada tipo Davis registró datos por casi un año que se muestran en la figura 19 donde se observa que en la fecha entre el 23 y 24 de abril ocurrió un evento de precipitación de 301.6 mm siendo este el evento de mayor registro.

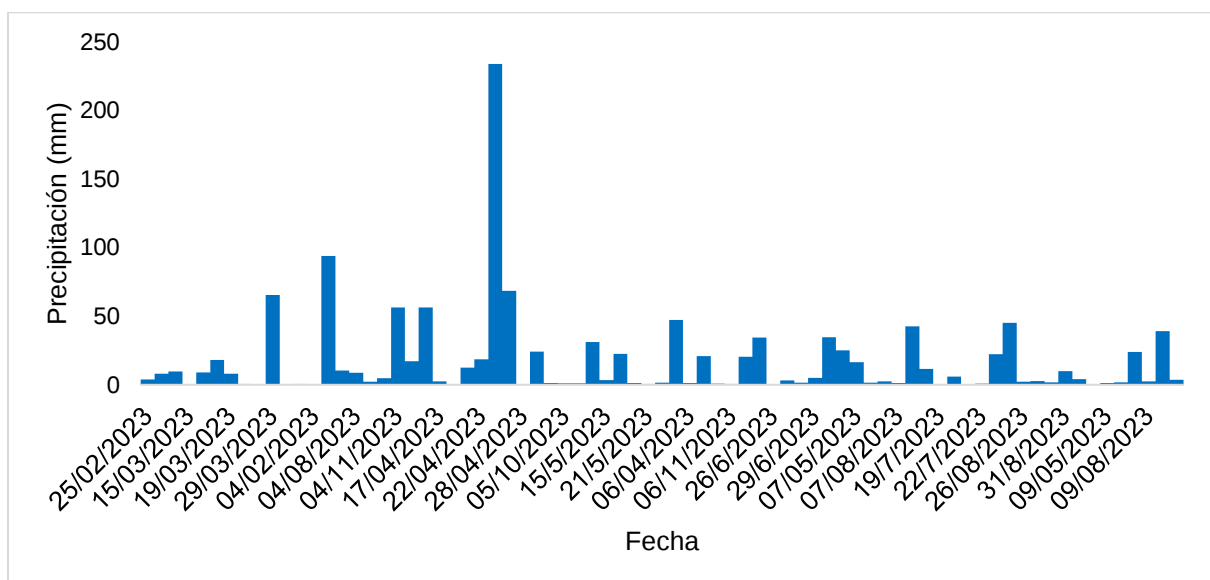


Figura 19. Precipitaciones registradas en el INIFAP “Las Margaritas”

3.4.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es la suma del vapor de agua liberada por el suelo y la vegetación hacia la atmosfera. Es un componente importante del ciclo del agua, por lo que debe ser contemplado en los eventos de lluvia. Para el presente proyecto se consideró que la evapotranspiración media en climas tropicales donde la temperatura media es de 20°C es de 3 a 5 mm por día. (Allen et al., 1998 y Tanaka et al., 2008). De acuerdo a Salas (2020) las especies de la selva tropical, similares a las del área de estudio de selva alta perennifolia, tienen una ET de entre 25 y 35%, y la referencia de ET es de 3.32±0.62 mm día⁻¹. (Cejudo, Andrade 2020; Monterroso, 2021; Abanto et al., 2020; Aguilos et al., 2021).

3.4.7. Retención por follaje

La retención de agua por follaje en sistema silvopastoril se obtuvo con la ecuación propuesta por Corbett and Crouse (1968) para pastos anuales:

$$I = (P + 58.7375)/31.25 \quad (7)$$

Donde I es intercepción (mm) y P es la precipitación (mm).

Para los sitios con mayor densidad de vegetación se consideró la metodología de Schosinsky (2006) que considera que los bosques densos interceptan el 20% de la lluvia precipitada. Para lo cual se implementa la siguiente ecuación para la retención del follaje:

$$I = P * (Cfo) \quad (8)$$

Donde: Cfo es el coeficiente de retención del follaje para bosques muy densos que equivale a un valor de 0.20.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Escorrentía superficial

Los hidrogramas de escorrentía para los diferentes usos de suelo y cobertura de los eventos de lluvia analizados sin considerar el flujo base que se registró en las microcuencas de Selva alta perennifolia, reforestación y plantación de bambú, para facilitar el análisis se muestran en las figuras 19, 20 y 21.

La escorrentía superficial en el sistema agroforestal a) silvopastoril y en la b) reforestación de bambú del evento de precipitación ocurrido entre 23 y 24 de abril del 2023 generó los siguientes hidrogramas (Figura 20). En los que se contrasta el escurrimiento ocurrido en un sistema agroforestal de tipo silvopastoril en el que ocurrió un caudal pico de hasta $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$ y en la reforestación de bambú el pico fue de $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$, observándose mayor caudal en el primero y mucho menor en la microcuenca de reforestación.

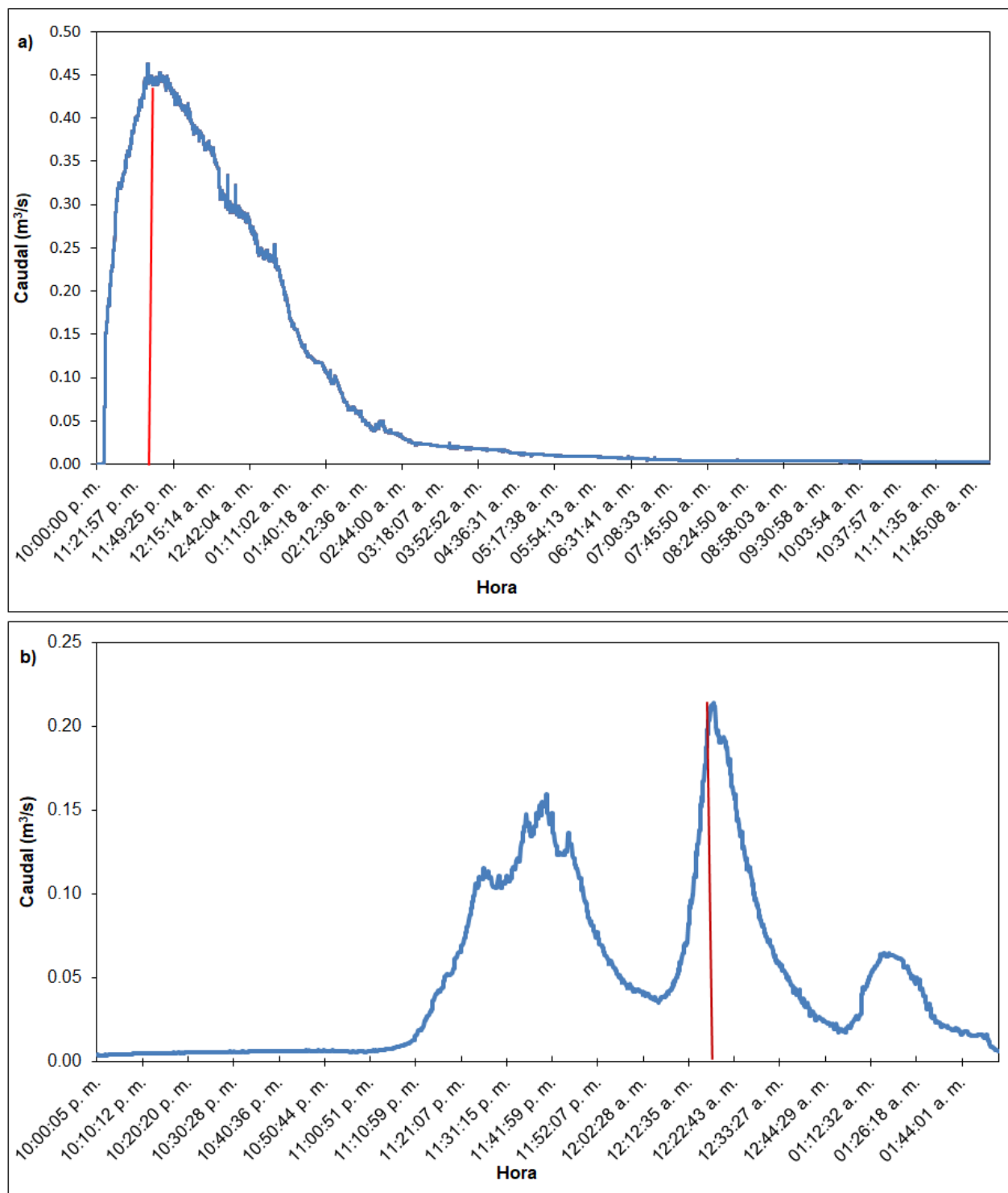


Figura 20. Caudal registrado el 23 y 24 de abril del 2023, en los sistemas de: a) Sistema silvopastoril y b) Área de forestación de bambú.

En los hidrogramas de la figura 21 se muestra el caudal generado por el evento de lluvia del 25 de agosto del 2023 en el sistema a) silvopastoril, b) plantación de bambú y en el sitio testigo de c) selva alta perennifolia. En los que se repite el comportamiento anterior, observándose un caudal pico más elevado en el sistema silvopastoril con $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ y menor en las microcuencas de plantación de bambú con $0.0020 \text{ m}^3/\text{s}$ y selva alta perennifolia con $0.0035 \text{ m}^3/\text{s}$ observando en éste último que el flujo base aumentó por más tiempo que en el resto de las microcuencas.

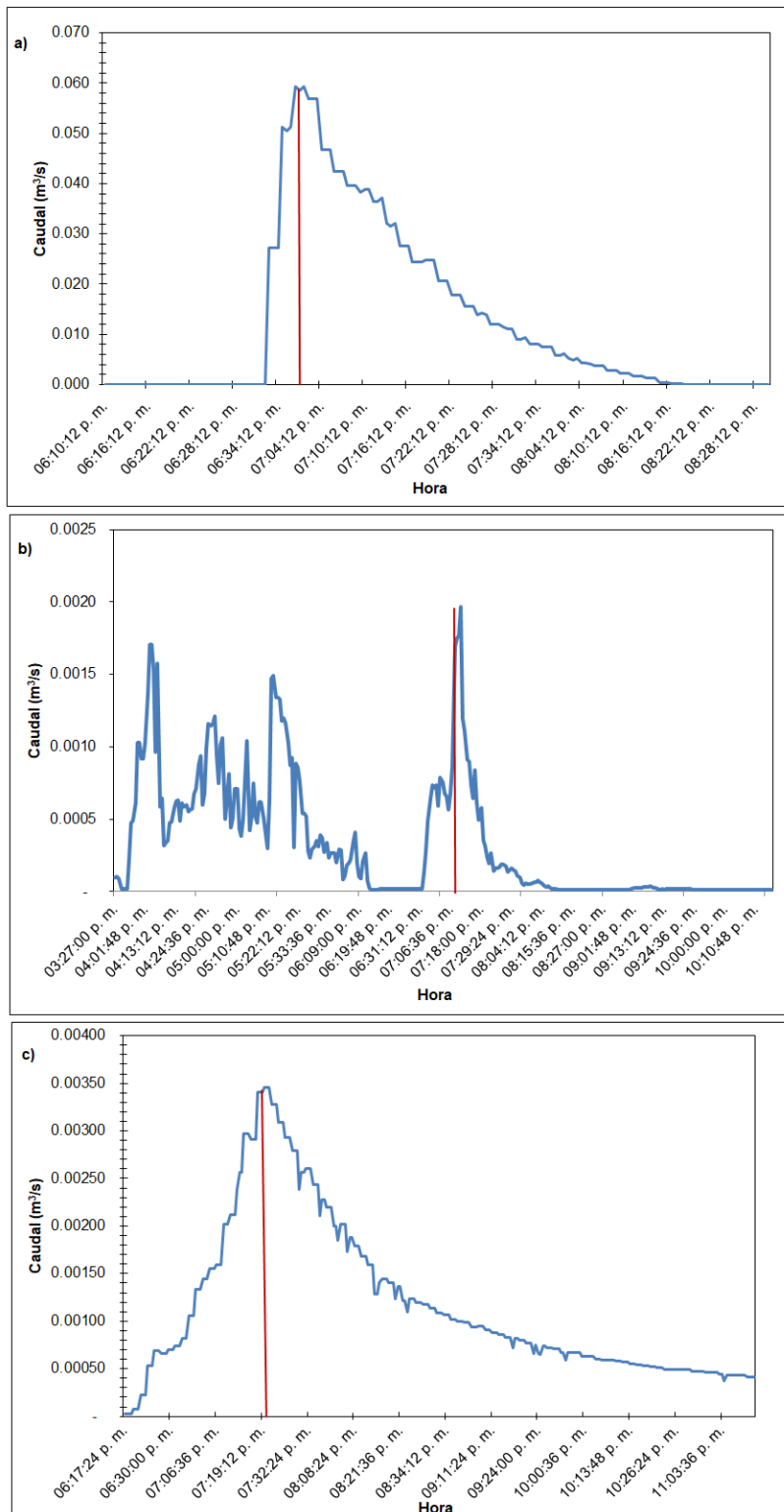


Figura 21. Caudal registrado el 25 de agosto del 2023 en los sistemas: a) silvopastoril; b) plantación de bambú y d) selva alta perennifolia

Para el evento de lluvia del 9 de septiembre del 2023 se generó el hidrograma de la figura 22 del sistema silvopastoril que alcanzó un caudal pico de 0.040 m³/s.:

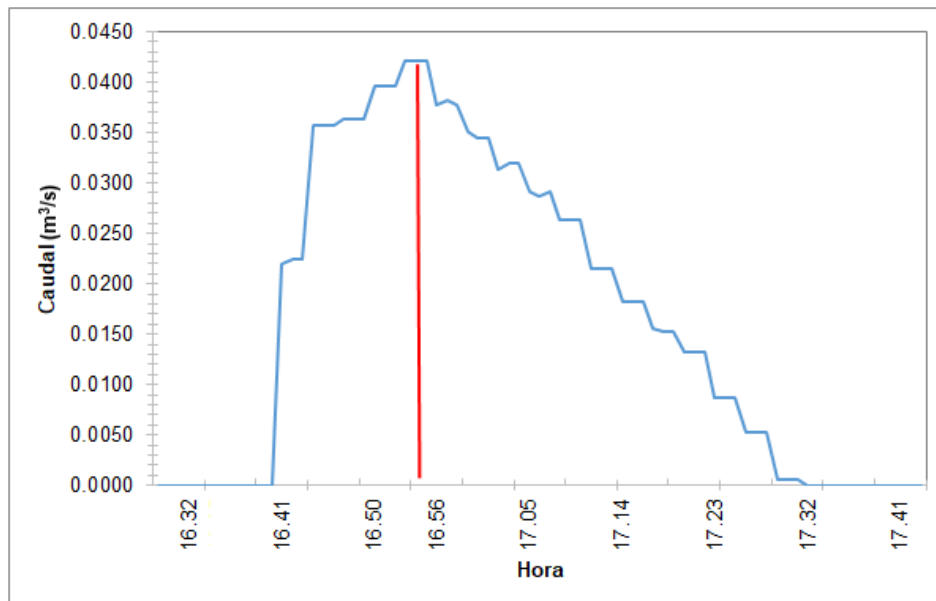


Figura 22. Caudal registrado en el sistema silvopastoril el 9 de septiembre del 2023.

En el cuadro 3 se muestra que el caudal generado en el sistema silvopastoril es mayor en comparación con las microcuencas de mayor cobertura arbórea, con una tasa de escurrimiento 0.5783 mm/ha y de 0.0008 mm/ha para el evento de mayor importancia (301.6 mm) en el área de reforestación, en el evento de precipitación de 45 mm la escorrentía en el sistema silvopastoril fue de 0.0236 y en la plantación de bambú fue de 0.0073 y en el área testigo de selva alta perennifolia fue de 0.0010 mm/ha, con lo cual se puede comprobar la importancia de la cubierta vegetal para disminuir la escorrentía (Matali, 2023), pues en el sistema silvopastoril aunque se presenta linderos con vegetación arbórea la extensa área con pastizal permite que el agua fluya en mayor volumen, confirmando que el cambio de uso de suelo aumenta el escurrimiento máximo (Bibi, 2023; Mekonnen, 2023; Ortíz, 2022; Siddik, 2022).

Cuadro 3. Volumen y láminas de escurrimiento de los sistemas de producción.

Fecha-Usos de suelo/Volumen y lámina de agua	23 y 24 de abril del 2023		25 de agosto del 2023			9 de septiembre del 2023
	Silvopastoril	Reforestación	Silvopastoril	Plantación	Selva alta perennifolia	Silvopastoril
Lámina precipitada (mm)	301.60	301.60	45.20	45.20	45.20	39.00
Volumen de escorrentía Superficial (m³)	3772.42	10.64	154.29	8.77	95.32	95.32
Lámina de escorrentía (mm)	14.77	0.029	0.604	0.0802	0.046	0.3732
Lámina de escorrentía unitaria (mm/ha)	0.5783	0.0008	0.0236	0.0073	0.0010	0.0146
Caudal pico (m³/s)	0.4621	0.2139	0.0592	0.0020	0.0034	0.0420

Recarga potencial

De acuerdo a los datos medidos en campo, en el sistema productivo silvopastoril se presentó la mayor recarga potencial con 253.80 mm, en cambio en las áreas arboladas fue menor, en la cobertura de reforestación fue de 219.19 mm para el evento de lluvia de 301.6 mm, en el segundo evento donde precipitaron 45 mm, se estimó una recarga de 19.58 mm del sistema silvopastoril, 17.92 mm en la plantación de bambú y 16.47 mm en el área testigo de selva alta perennifolia, para el tercer evento de 39 mm de pp del sistema silvopastoril fue de 14.00 mm. A diferencia de la estimación de recarga potencial para el sistema silvopastoril, la recarga en los sitios boscosos es coherente con el trabajo de Siddik (2022), en el que se registró ligeramente mayor recarga media mensual en áreas con suelos desnudos que en áreas con vegetación con 30.5 mm y 29.2 mm. Pues, aunque la infiltración fue importante en las zonas boscosas, parte del agua fue retenida por el suelo debido a la presencia de raíces de los árboles (Matali, 2023).

Cuadro 4. Recarga potencial al acuífero por sistema productivo.

Fecha	Sistema productivo	Precipitación (mm)	Duración (min)	Retención por follaje	CRC (mm)	Recarga potencial I (mm)	Recarga potencial I (%)
23-24/04/2023	Silvopastoril	301.6	720.0	11.53	18.5	253.80	84.15
25/08/2023	Silvopastoril	45.0	91.8	3.32	18.5	19.58	43.50
09/09/2023	Silvopastoril	39.0	118.2	3.13	18.5	14	35.90
23-24/04/2023	Reforestación de bambú	301.6	720.0	60.32	11	219.19	72.68
25/08/2023	Plantación de bambú	45.0	91.8	9	13	17.92	39.82
25/8/2023	Selva alta perennifolia	45.0	91.8	9	14.5	16.47	36.60

En la figura 23 se comparan los eventos de precipitación con el porcentaje de recarga de acuíferos que ocurre en cada uso de suelo y cobertura, de acuerdo a las condiciones particulares de las microcuencas delimitadas, el sistema silvopastoril presenta mayor porcentaje de recarga respecto a las otras microcuencas, entre 80 y 35.9%, lo cual podría atribuirse a la pendiente promedio de la microcuenca está entre 0-15% con un relieve que presenta laderas y pequeños depresiones que podrían acumular el agua de lluvia por mayor tiempo permitiendo por más tiempo el proceso de infiltración, además se encontró que el suelo de este sistema tienen mayor contenido de materia orgánica (3.35%) lo cual permite que retenga más agua cerca de 20 veces más su peso, al ser suelos franco-arenosos con textura gruesa (FAO,2023), y/o llevar parte del agua total de lluvia hacia pequeñas escorrentías diferentes al del escurrimiento principal donde se sitió el aforo, el segundo sitio de mayor recarga fue el de reforestación con bambú, donde el porcentaje de recarga fue del 72.68% lo cual podría deberse a que el suelo es de tipo Franco-arcillo-arenoso, y la arcilla tiene una capacidad intermedia de retención de agua. En la microcuenca de plantación el porcentaje de recarga fue de 39.82% y en el sitio testigo de selva alta perennifolia fue del 36.60% con lo que se observa la importancia de las áreas conservadas, para la recarga de acuíferos. Esto difiere con los resultados de la investigación de Garate, et al (2022) donde, se registró mayor infiltración en las áreas boscosas que en las de pastizales, no obstante, en el de Siddik (2022) fue mayor en

áreas desnudas con suelos arenosos que en áreas boscosas. Cabe mencionarse que las condiciones topográficas del sistema silvopastoril presentaba una de pendiente (0-15%) que pudo permitir mayor recarga, demostrando que los pastizales con árboles cumplen una importante función como captadores de agua potenciales para la recarga de acuíferos. (Matalí, 2023). Aunque se haya registrado menor recarga en las áreas boscosas, lo cual que podría deberse a que la interceptación por follaje es importante y a la pendiente promedio de estas áreas boscosas que están en un rango entre 15 y 40% y a la retención del agua en la zona de raíces.

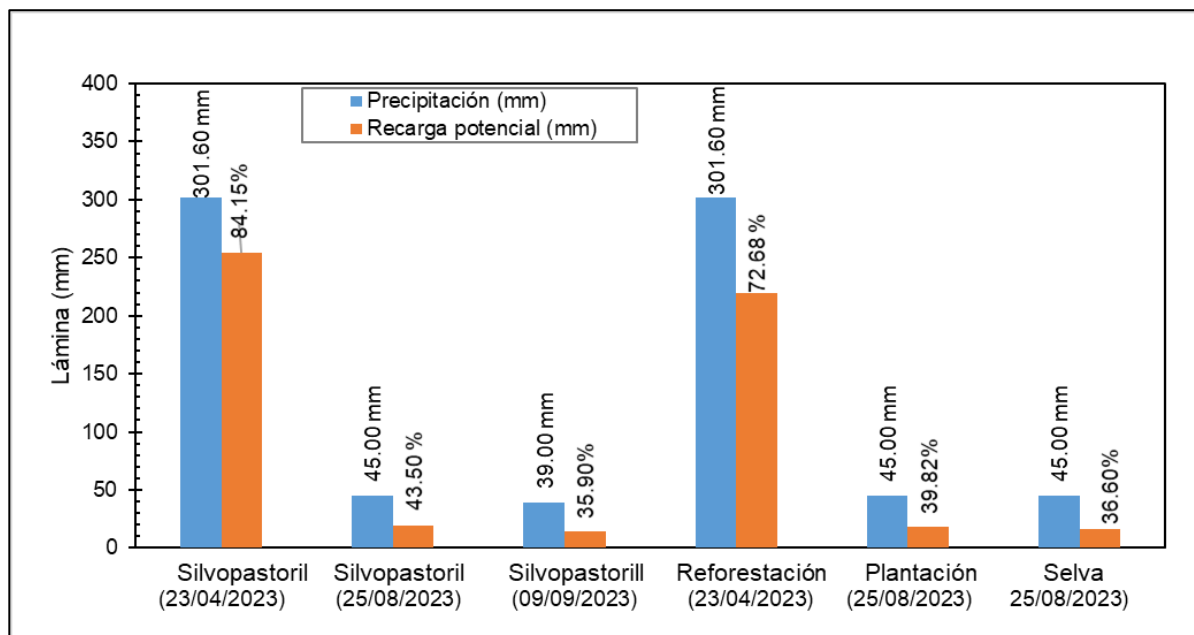


Figura 23. Comparación de precipitación y % de Recarga potencial de acuíferos en cada uso de suelo.

Un evento de lluvia ocurre con una intensidad particular produciendo una recarga potencial que se puede observar en la figura 24 donde la intensidad máxima de lluvia permitió una mayor recarga, en el sistema silvopastoril y menor en el área reforestada. Este comportamiento se repite en las áreas boscosas como en la plantación de bambú, reforestación y el área testigo de selva alta perennifolia donde se presentó menor recarga potencial que en la de pastizal.

A pesar de que la capacidad de retención del suelo es mayor en la microcuenca de plantación que en la selva y que el porcentaje de superficie que cubren las pendientes

fuertes (15-40%) en ambas es similar, las diferencia en la recarga potencial para el mismo evento de lluvia, puede ser debido a que la precipitación no fue la misma pues su distribución suele ser diferente Imran et al., (2024), cabe mencionarse que sólo se instaló un pluviómetro en el área más cercana a las microcuencas.

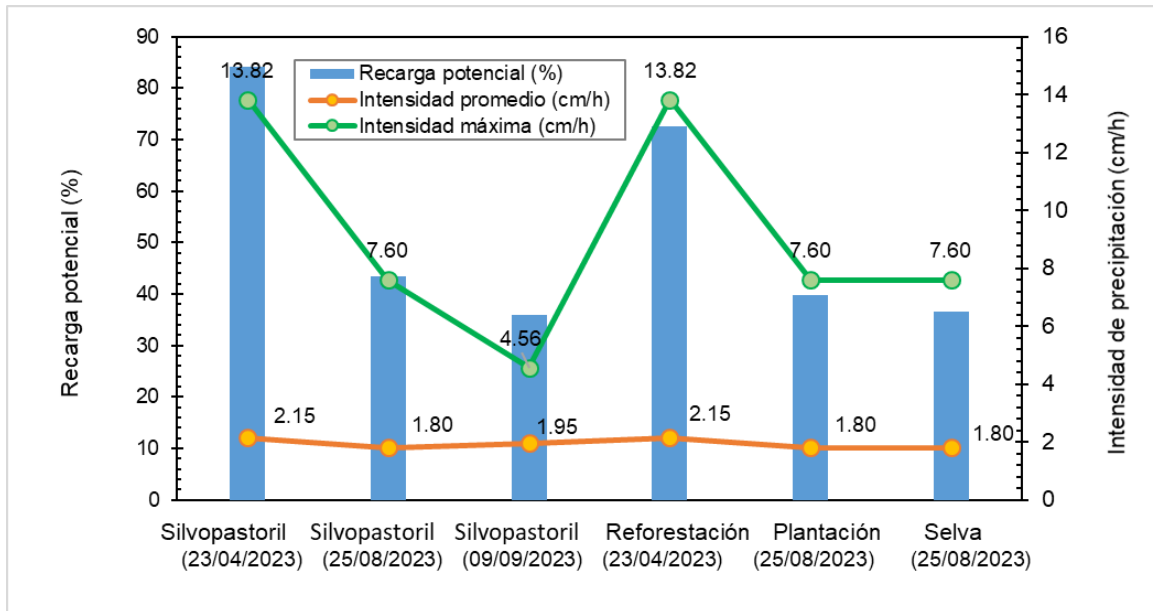


Figura 24. Comparativo de recarga potencial con intensidad de lluvia promedio y máxima.

En las gráficas a), b) y c) de la figura 25 se tienen los histogramas ocurridos el 23 y 24 de abril, 25 de agosto y 9 de septiembre del año 2023, donde ocurrió una precipitación de 309 mm, 45 y 39 mm correspondientemente. En el primer evento la cantidad de precipitación fue elevada durante las primeras dos horas, aunque duró 12 horas, esto permitió que la recarga potencial de acuífero fuera alta, de acuerdo a la figura 25, debido disponibilidad de agua en el suelo saturado durante más tiempo, permitiendo mayor infiltración y recarga al acuífero, principalmente en el área del sistema silvopastoril. Para el evento del 25 de agosto, se registró una precipitación de 45 mm que duró 40 minutos, lo cual se refleja en la recarga potencial del acuífero (Figura 25) donde la recarga potencial fue de 43.50% en el sistema silvopastoril, de 39.82% en la plantación de bambú y de 36.60% en la selva lo cual nos indica que las áreas con mayor vegetación arbórea juegan un papel importante para la captación de agua de lluvia por medio de su follaje, permitiendo menor escorrentía. Para el 9 de septiembre el evento se registró una

precipitación de 39 mm que duró una hora y media por lo que la recarga potencial fue del 35.90% en sistema silvopastoril.

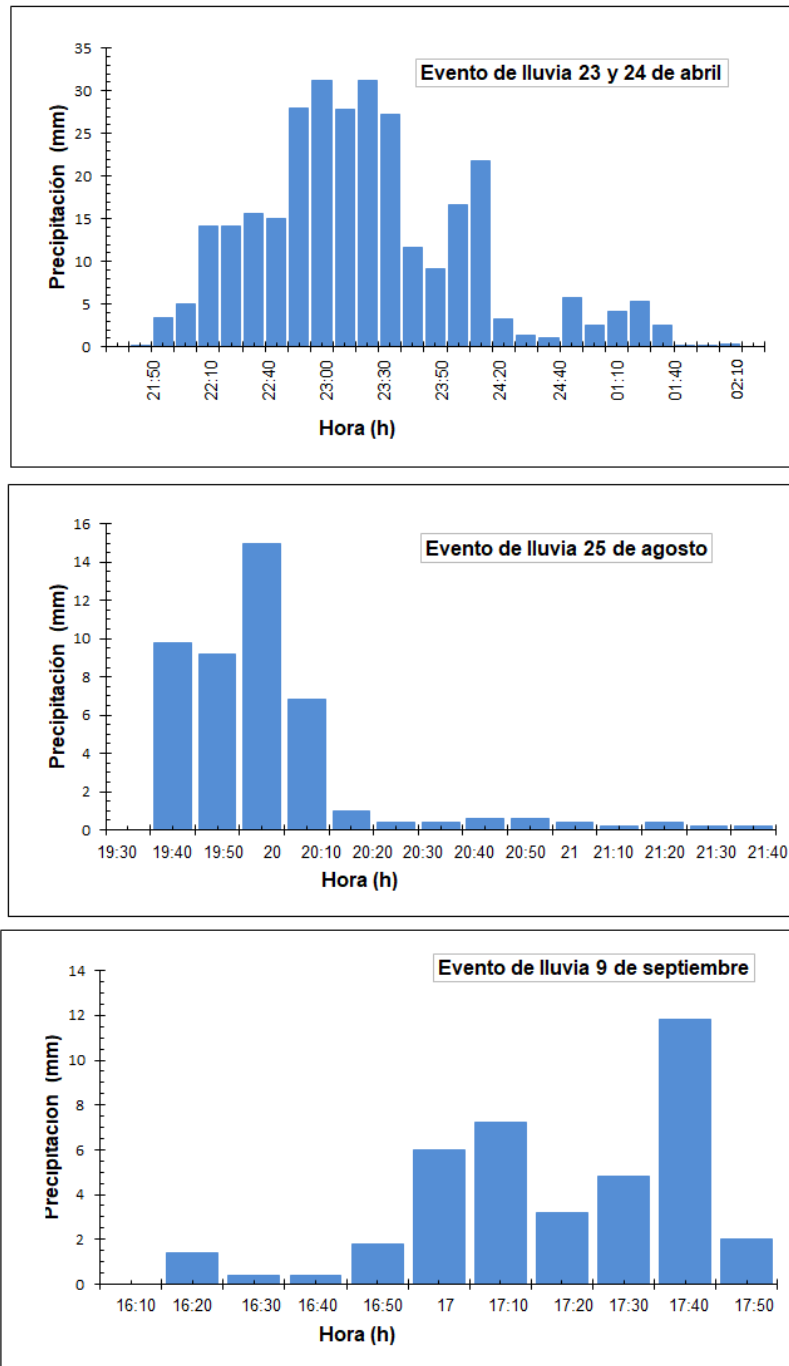


Figura 25. Histograma de las precipitaciones del año 2023.

En la figura 26 se muestran las gráficas de intensidad de precipitación (mm/h) (a, b y c) de la fecha 23 y 24 de abril del 2023 a) en la que se obtuvo una intensidad de entre los 180 mm/h 6.19 mm/h que duró 12 horas, por lo que el agua encharcada en el suelo dio paso a la recarga de acuífero, al permanecer húmedo mayor tiempo. Al ser un evento nocturno se espera que la evapotranspiración haya sido baja, permitiendo mayor disponibilidad del agua en el suelo para ser infiltrado, cabe mencionarse que este evento fue de los primeros del año y el más importante. En la gráfica b) del evento del 25 de agosto de lluvia llegó a durar dos horas donde los primeros 40 minutos fueron intensos llegando hasta los 90 mm/h en 10 minutos, bajando dicha intensidad hasta mantenerse casi constante durante el resto del tiempo, es decir que hubo disponibilidad de agua en mayor tiempo esto permitió que la infiltración diera lugar a la recarga potencial. En la gráfica c) la intensidad del 9 de septiembre llegó hasta los 75 mm/h, y estuvo entre los 25 y 40 mm/h durante 40 minutos, en el que la lluvia comenzó con poca intensidad de lluvia y al final de esta emitió una gran cantidad de agua lo cual terminó casi abruptamente.

Reiterándose la importancia que la cobertura vegetal arbórea tiene para la captación de agua de lluvia por su follaje y retención en sus raíces, (Matali, 2023; Siddik 2022; Ortiz 2022, Lei, Wagner & Fohrer, 2022), facilitando la infiltración y recarga al acuífero que se refleja en el flujo base observado, no obstante, las zonas bajas de la microcuenca con poca pendiente son sitios potenciales de recarga de acuíferos (Palma, 2022), lo cual también dependerá de la intensidad de lluvia.

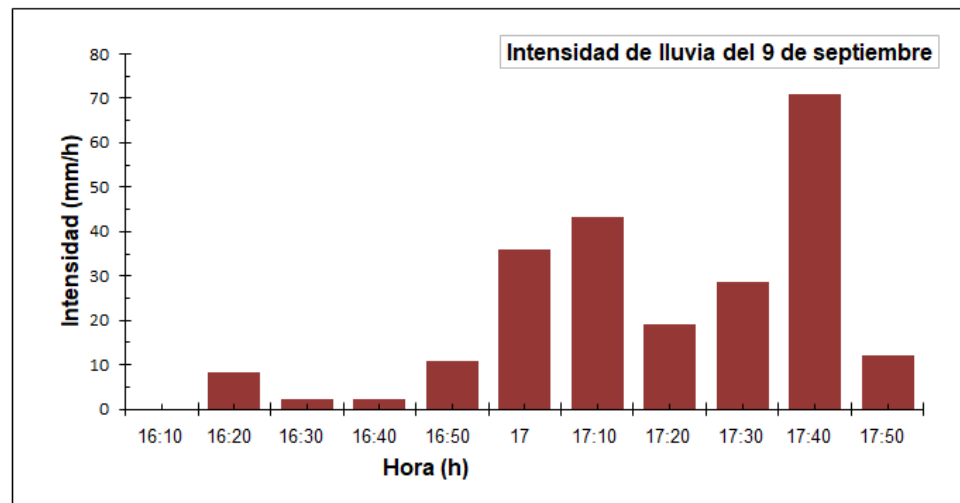
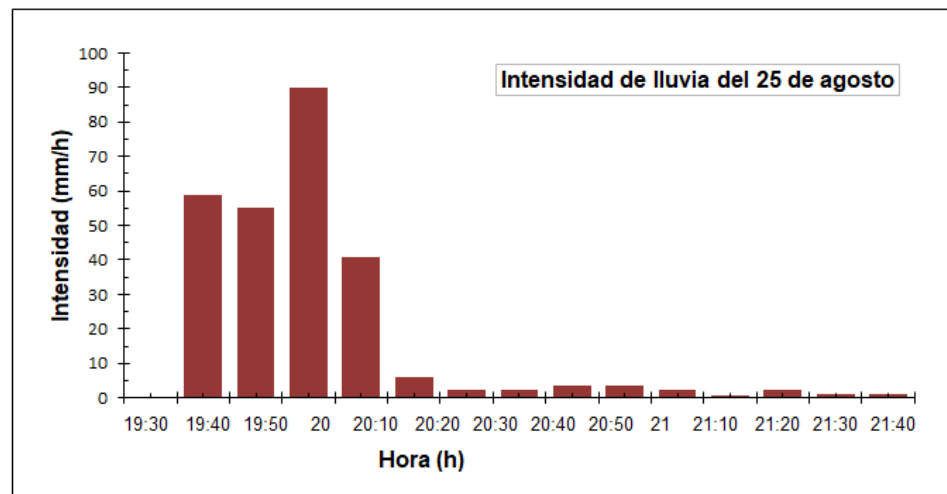
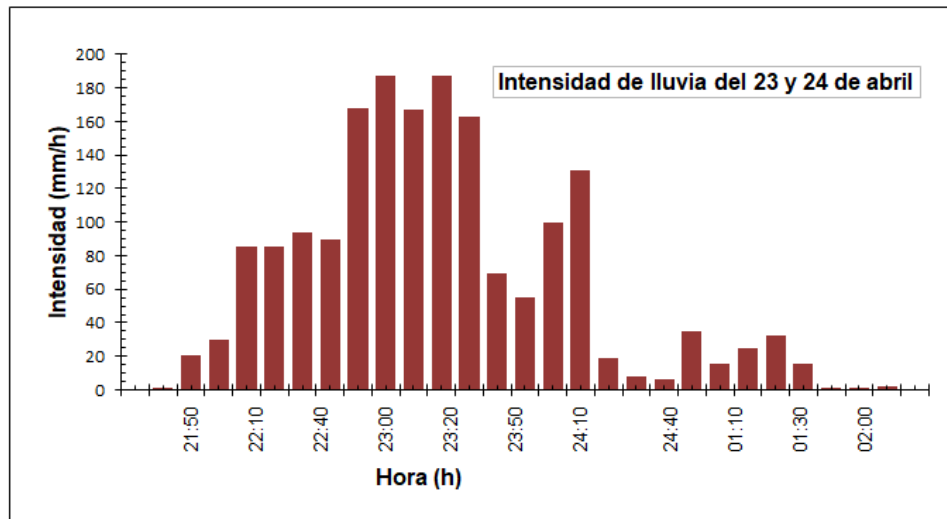


Figura 26. Intensidad de lluvia del 23 y 24 de abril del 2023.

3.6 CONCLUSIONES

Hubo un efecto positivo en la recarga potencial al acuífero por tipo de cobertura vegetal y uso de suelo, que se diferenció por sus características topográficas y tipo de suelo, obteniéndose de mayor a menor porcentaje con respecto a lo precipitado: silvopastoril, reforestación, plantación y Selva alta perennifolia.

Para el presente estudio, se estimó mayor recarga de acuíferos en el Sistema silvopastoril, debido a que su relieve plano con depresiones topográficas en la mayor parte de la superficie (pendientes de 0-15%) y mayor contenido de materia orgánica, duración e intensidad de lluvia, no obstante las demás microcuencas presentaron una pendiente entre 15-45% lo que disminuye el tiempo de infiltración y su potencial para la recarga hídrica, sin embargo, el segundo sistema de mayor recarga fue el de reforestación debido a su tipo de suelo, red de drenaje poco ramificada, duración e intensidad de lluvia, la selva alta fue la de menor recarga debido a su relieve accidentado con pendientes fuertes y por tener una red de drenaje superficial más ramificada y de mayor longitud al resto de las microcuencas.

Estos resultados pueden servir como una referencia para planear los usos de suelo, en coherencia con el relieve, clima entre otras condiciones que permitan potenciar la mayor recarga de acuíferos, lo que brindará un beneficio económico por el uso diversificado de los recursos forestales, del suelo y el agua.

3.7 Literatura citada

- Alarcon-Zuniga, B., Ramirez-Gonzalez, J. J. M., Quijano-Hernandez, S., & Cervantes-Martinez, T. (2015). Yield components of three *Brachiaria* species harvested at two cutting frequencies in Hueytamalco, Puebla, Mexico. In *Molecular Breeding of Forage and Turf: The Proceedings of the 8th International Symposium on the Molecular Breeding of Forage and Turf* (pp. 123-130). Springer International Publishing.
- 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.
- Bibi, T. S., Reddythta, D., & Kebebew, A. S. (2023). Assessment of the drainage systems performance in response to future scenarios and flood mitigation measures using stormwater management model. *City and Environment Interactions*, 19, 100111.
- Bosi, C., Pezzopane, J. R. M., & Sentelhas, P. C. (2020). Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. *Agroforestry Systems*, 94(2), 429–440.
- Bruijnzeel, L. A. (1990). Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*.
- Castro, E. D. C., Hernández, J. I. V., Pérez, G. Á., & Valverde, G. R. (2021). Stand structure and tree diversity in three land management systems in Palmagtitán, Sierra Norte de Puebla. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3).
- Clavijo Rojas, C. (2016). Factibilidad técnica y económica del modelo doble propósito en Chontla Hueytamalco, Puebla (Bachelor's thesis).
- CONAFOR (2020) Resumen Ejecutivo Deforestación 2001-2018 México. (n.d.).
- Corbett, E. S., & Crouse, R. P. (1968). Rainfall interception by annual grass and chaparral. USDA Forest Service Research Note PSW, 48, 12.
- (FAO, 2023). Recuperado el 4 de marzo de 2023: (<https://www.fao.org/3/xii/ms12a-s.htm>)
- INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Hueytamalco Puebla.
- INEGI, 2014. Recuperado de: <http://mapserver.inegi.org.mx/mg>
- INEGI. (2021). Vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 producción 2017-2021. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- INEGI. (2021). Vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 producción 2017-2021. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>

- Imran, M., Hou, J., Wang, T., Li, D., Gao, X., Noor, R. S., ... & Ameen, M. (2024). Assessment of the Impacts of Rainfall Characteristics and Land Use Pattern on Runoff Accumulation in the Hulu River Basin, China. *Water*, 16(2), 239.
- Kalédjé, P. S. K., Ndam Ngoupayou, J. R., Rakotondrabe, F., & Mvondo Ondo, J. (2020). Quantitative assessment of water resources by the method of the hydrological balance in the Kadey catchment area (East-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development*, 10.
- Lei, C., Wagner, P. D., & Fohrer, N. (2022). Influences of land use changes on the dynamics of water quantity and quality in the German lowland catchment of the Stör. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 2561–2582.
- Leul, Y., Assen, M., Damene, S., & Legass, A. (2023). Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*, 147, 110024.
- Li, L., Yang, Y., Cui, T., Li, R., & Zheng, H. (2023). Land Use, Climate, and Socioeconomic Factors Determine the Variation in Hydrologic-Related Ecosystem Services in the Ecological Conservation Zone, Beijing, China. *Water (Switzerland)*, 15(11).
- Liu, Y., Zhao, L., Liu, Y., Huang, Z., Shi, J., Wang, Y., Ma, Y., Esteban Lucas-Borja, M., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2022). Restoration of a hillslope grassland with an ecological grass species (*Elymus tangutorum*) favors rainfall interception and water infiltration and reduces soil loss on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 219.
- Matali, N. S., Rahman, E. K. A., & Ratnayake, U. (2023, January). Effects of root developments and vegetation cover on soil water infiltration. *In AIP Conference Proceedings (Vol. 2643, No. 1)*. AIP Publishing.
- Mekonnen, Y. A., & Manderso, T. M. (2023). Land use/land cover change impact on streamflow using Arc-SWAT model, in case of Fetam watershed, Abay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 13(5).
- Ortiz-Oliveros, H. B., Ávila-Pérez, P., Cruz-González, D., Villalva-Hernández, A., Lara-Almazán, N., & Torres-García, I. (2022). Climatic and hydrological variations caused by Land Use/Land Cover changes in the valley of Toluca, Mexico: A rapid assessment. *Sustainable Cities and Society*, 85.
- Palma-Nava, A., Pavón-Ibarra, I., Domínguez-Mora, R., & Carmona-Paredes, R. B. (2022). Estimación de la recarga natural en la Cuenca de México mediante la aplicación del método APLIS. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 23(2).
- Rezaei, A., & Mohammadi, Z. (2017). Annual safe groundwater yield in a semiarid basin using combination of water balance equation and water table fluctuation. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 241–248.
- Ruíz-García, V. H., Borja de la Rosa, M. A., Gómez-Díaz, J. D., Asensio-Grima, C., Matías-Ramos, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2022). Forest Fires, Land Use Changes and Their Impact on Hydrological Balance in Temperate Forests of Central Mexico. *Water (Switzerland)*, 14(3).

- Salem, A., Abduljaleel, Y., Dezső, J., & Lóczy, D. (2023). Integrated assessment of the impact of land use changes on groundwater recharge and groundwater level in the Drava floodplain, Hungary. *Scientific Reports*, 13(1).
- 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.
- Shrestha, G., Shakya, B. M., Shrestha, M. B., & Khadka, U. R. (2023). Water infiltration rate in the Kathmandu Valley of Nepal amidst present urbanization and land-use change. *H2Open Journal*, 6(1), 1–14.
- Siddik, M. S., Tulip, S. S., Rahman, A., Islam, M. N., Haghighi, A. T., & Mustafa, S. M. T. (2022). The impact of land use and land cover change on groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, 315.
- Ven, T. C., MAIDMENT, D. R., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. Editorial Mc Graw Hill, Santafé de Bogotá–Colombia, 2-5.
- Zhang, Y. wang, Wang, K. bo, Wang, J., Liu, C., & Shangguan, Z. ping. (2021). Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*, 11(1).

4. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y RECARGA POTENCIAL AL ACUÍFERO TECOLUTLA MEDIANTE EL MODELO HEC-HMS

4.1 Resumen

El abatimiento de los acuíferos en México se debe, en gran parte, a que se desconoce el comportamiento del fenómeno lluvia-escorrentía en sus cuencas y por tanto hay un desequilibrio entre la disponibilidad hídrica y lo concesionado. La modelación hidrológica con el modelo HEC-HMS puede ser una alternativa viable para conocer la infiltración en el suelo e inferir la recarga potencial de acuíferos, pues es un modelo mundialmente empleado con éxito. El objetivo de esta investigación fue obtener la recarga potencial del acuífero Tecolutla en algunos eventos de lluvia del 2023 con el modelo HEC-HMS calibrado, en cuatro microcuencas del predio del INIFAP Las Margaritas, Veracruz, cuyos usos son: Silvopastoril, reforestación con bambú, plantación de bambú y selva alta perennifolia como testigo. Con la lámina de retención de los suelos y la lámina infiltrada se obtuvo la recarga potencial; la lámina infiltrada se obtuvo por diferencia entre la precipitación, escorrentía, retención por follaje y pérdidas por evapotranspiración. La calibración del modelo fue difícil y en la mayoría de los casos, según el índice de Nash-Sutcliffe, la representación de los hidrogramas de escorrentía directa resultó insuficiente; sin embargo, las láminas de escorrentía y caudales pico fueron semejantes a los observados en un 85.8%. La recarga potencial porcentual de lo que precipitó en el sistema silvopastoril fue de 52.2 a 91.5%, en eventos con láminas de lluvia de 39.0 a 301.6 mm; de 95% en reforestación con bambú para 301.6 mm de precipitación; 71.1% en plantación de bambú y 67.9% en selva alta perennifolia para 45.0 mm de precipitación. La recarga potencial está influenciada por el grupo hidrológico del suelo, precipitación y capacidad de retención del suelo. El modelo HEC-HMS puede ser una herramienta valiosa para la estimación del volumen de escorrentía, infiltración y caudal pico en cuencas pequeñas no aforadas.

Palabras clave: Infiltración, escorrentía superficial, acuífero, cobertura y uso de suelo.

Tesis de maestría en Agroforestería, Posgrado en Agroforestería para el desarrollo sostenible, Universidad Autónoma, Chapingo.

Autor: Dalinda Ramírez Sánchez Director Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

SURFACE RUNOFF AND POTENTIAL RECHARGE TO THE TECOLUTLA AQUIFER USING THE HEC-HMS MODEL

4.2 Abstract

The depletion of aquifers in Mexico is largely due to the fact that the behavior of the rainfall-runoff phenomenon in their basins is unknown and, therefore, there is an imbalance between water availability and concessions. Hydrological modeling with the HEC-HMS model can be a viable alternative to know the infiltration in the soil and to infer the potential recharge of aquifers, since it is a model successfully used worldwide. The aim of this research was to obtain the potential recharge of the Tecolutla aquifer in some rainfall events of 2023 with the calibrated HEC-HMS model, in four micro-watersheds of the INIFAP Las Margaritas, Veracruz, whose uses are: Silvopastoral, reforestation with bamboo, bamboo plantation and high evergreen forest as a control. The potential recharge was obtained with the soil retention and infiltration lamina; the infiltration lamina was obtained by the difference between precipitation, runoff, foliage retention and evapotranspiration losses. Model calibration was difficult and, in most cases, according to the Nash-Sutcliffe index, the representation of the direct runoff hydrographs was insufficient; However, runoff sheets and peak flows were similar to those observed at 85.8%. The percentage potential recharge from rainfall in the silvopastoral system ranged from 52.2 to 91.5%, in events with rainfall sheets from 39.0 to 301.6 mm; 95% in reforestation with bamboo for 301.6 mm of rainfall; 71.1% in bamboo plantation and 67.9% in high evergreen forest for 45.0 mm of rainfall. Potential recharge is influenced by the hydrologic group of the soil, precipitation and soil retention capacity. The HEC-HMS model can be a valuable tool for estimating runoff volume, infiltration and peak flow in small ungauged watersheds.

Keywords: Infiltration, surface runoff, aquifer, land cover and land use.

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

Author: Dalinda Ramírez Sánchez.

Advisor: Dr. Jorge Víctor Jorge Hernández

4.3 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso hidrológico muy importante para la sostenibilidad social, económica y ambiental, (Jung et al., 2023) en todo el mundo (Shekar & Mathew, 2023). Su disposición depende del balance del ciclo hidrológico que distribuye el agua en la tierra, a partir de la lluvia desde las zonas altas a las bajas en la superficie terrestre por el cual recorren las corrientes superficiales, lagos, mantos acuíferos o ríos subterráneos, durante el cual ocurren procesos como la evapotranspiración e infiltración. Ante la reserva de agua, los ecosistemas son sostenidos por esta disponibilidad así como el humano la implementa para su consumo con diferentes objetivos (Zekrifa et al., 2023), por ejemplo, en México se cuenta con 451,584.7 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, usando el 60.8% del agua superficial (ríos, arroyos y lagos) y el 39.2% se extrae de los acuíferos del cual se extrae el 75.7% de agua para la agricultura, el 14.7% al abastecimiento público, el 4.9% a la industria autoabastecida y el 4.7% a la energía eléctrica (CONAGUA, 2019).

Puesto que el uso de aguas superficiales y subterráneas está disminuyendo como resultado del uso excesivo por el crecimiento demográfico (Sabale, Venkatesh & Jose, 2023). Es necesario planificar el manejo de los recursos hídricos, para lo cual se han desarrollado diversas metodologías, en las que se cuantifican las entradas y salidas del proceso hidrológico lluvia-escorrentía (Guduru, 2023). No obstante, no es posible tener puntos de aforo en cada punto de descarga, por lo cual se implementan modelos hidrológicos que son herramientas ampliamente usados para simular muchos procesos del ciclo hidrológico (Sahu, Shwetha & Dwarakish, 2023).

Una de las metodologías más usadas es la curva numérica propuesta por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (NRCS-USDA, 2004; Angulo & Saavedra, 2021; Sahu Shwetha & Dwarakish, 2023) por su simplicidad para el cálculo de escorrentía (Singh., et al 2023) ya que requiere pocos parámetros como es el uso de la tierra y cobertura, grupo hidrológico del suelo y condición de humedad antecedente, (Huang, Tsai & Chiang, 2024; Sahu,

Shwetha & Dwarakish, 2023; Cacal, Austria & Taboada, 2023; Janicka, et al., 2023; Janicka y Kanclerz, 2022), así como datos de precipitación y de aforo. Una de las alternativas más simples actuales para la simulación hidrológica en el que se puede estimar el número de curva el HEC-HMS en el que se pueden implementar diferentes metodologías para el cálculo de la escorrentía superficial, infiltración y recarga de acuíferos. con el objetivo de reflejar el comportamiento físico observado en campo o en experimentos (Friswell y Mottershead, 1995).

Aun cuando se tienen modelos como el HEC-HMS para la simulación hidrológica de cuencas, actualmente es difícil obtener datos de descarga, por la complejidad de colocar sitios de aforo a lo largo de los ríos. Es por ello que el uso de estas herramientas que se usan extensamente para simular muchos procesos del ciclo hidrológico facilitan la generación de información de muchos procesos del ciclo hidrológico (Sahu, Shwetha & Dwarakish, 2023).

Por lo anterior, en el presente proyecto se instalaron equipos para aforar los escurrimientos superficiales y con ello obtener datos que permitan identificar la influencia de las características de la lluvia, tipo de suelo, vegetación y topografía, en el comportamiento de la escorrentía superficial e infiltración en el suelo. posteriormente, calibrar un modelo hidrológico para estimar escorrentía superficial e infiltración en diferentes tipos y usos de suelo, que permitan hacer estimaciones en microcuencas no aforadas. De esta forma se dejará un precedente de la efectividad del uso del modelo HEC-HMS y su ajuste con los datos medidos de cuencas pequeñas, con los que se estimará la recarga potencial de acuíferos en diferentes coberturas y uso de suelo.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Sitio de estudio

El área de estudio se encuentra en la Cuenca del Río Tecolutla, al Noreste del Estado de Puebla entre los paralelos 19°52' y 20°12' de latitud norte; los meridianos 97°12' y 97°23' de longitud oeste; altitud entre 100 y 1900 msnm (figura 27). El clima, de acuerdo

los criterios de Koppen y E. García es semicálido húmedo con lluvias todo el año. El rango de la precipitación media está entre 1500 mm a 2500 mm y el de temperatura entre 16 y 26°C (INEGI, 2010). Se trata de un área geológica con rocas de tipo sedimentaria, tipo lutita-Arenisca To(lu-ar) de la era Cenozoica, en el área de estudio no hay fallas geológicas. El Relieve corresponde a llanura aluvial con lomerío. Hidrogeológicamente el área de estudio es de permeabilidad baja a alta, del terciario marino, lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados. (CONAGUA, 2023).

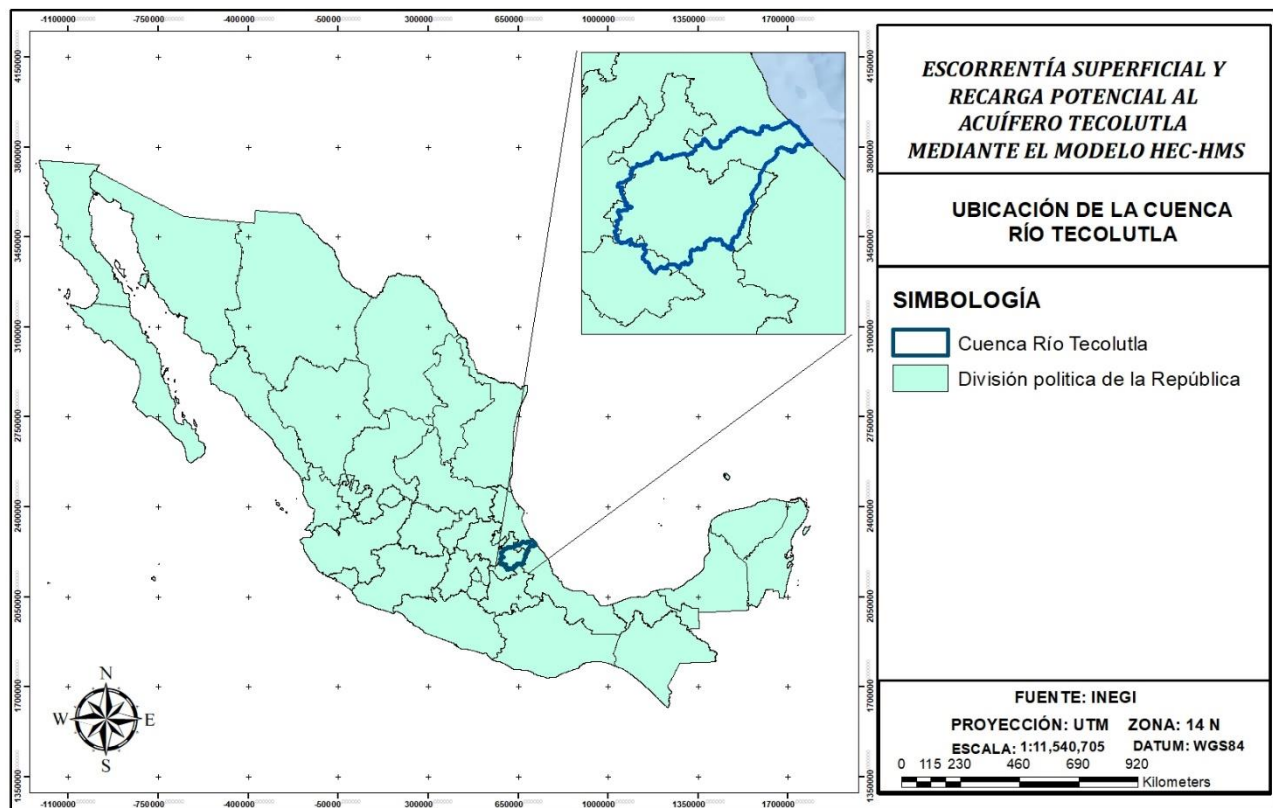


Figura 27. Ubicación de la Cuenca del Río Tecolutla.

4.4.2. Cuencas de estudio

Para la primera etapa se implementó SIG (Sistemas de información geográfica) por medio del software ArcGis 10.8 implementado para ubicar el área de estudio y conocer las características climáticas, topográficas, geológicas, de relieve, tipos de suelo e hidrología del lugar, para lo cual se utilizaron capas vectoriales del INEGI (2021) escala 1:250,000, también se obtuvo el Modelo digital de elevaciones del sitio oficial de Alaska Satellite

Facility, Data search Vertex con una resolución de 12.5 m, para conocer la pendiente de las microcuencas, delimitar las microcuencas por medio de las herramientas de cálculo de dirección de flujo, acumulación de flujo, para posteriormente definir las corrientes de acuerdo al valor del MDE y condicionar la clasificación de las celdas con acumulación de flujo para obtener la red de drenaje, la cual se procede a definir como líneas. Posteriormente se crea un shapefile de punto en el sitio de aforo que es el área de salida de las corrientes superficiales y para finalizar con la herramienta que está de cuenca se define la microcuenca, que se debe convertir de raster a shapefile.

Una vez que se ubicó y proyectó a UTM en zona 14 el área del proyecto, se recortó el modelo digital de elevación con la capa vectorial correspondiente al predio del campo experimental INIFAP “Las Margaritas”, con la finalidad de obtener la capa de las corrientes superficiales con la herramienta Hydrology de ArcGis y cotejarlas con la capa vectorial del INEGI de hidrología para ubicar las corrientes superficiales. Para elegir los sitios de estudio, se interpusieron las capas vectoriales de uso de suelo del INEGI (2021), hidrología, las delimitaciones de uso brindadas por el INIFAP, campo experimental “Las margaritas” obteniendo las posibles microcuencas y con ello se propusieron los sitios de aforo. Posteriormente se cotejaron mediante recorridos de campo y corrección en gabinete, seleccionando microcuencas con distintos usos de suelo y cobertura, correspondientes a: sistema silvopastoril, área reforestada con Bambú, plantación de Bambú y un área testigo de Vegetación arbórea de Selva alta perennifolia (figura 28).

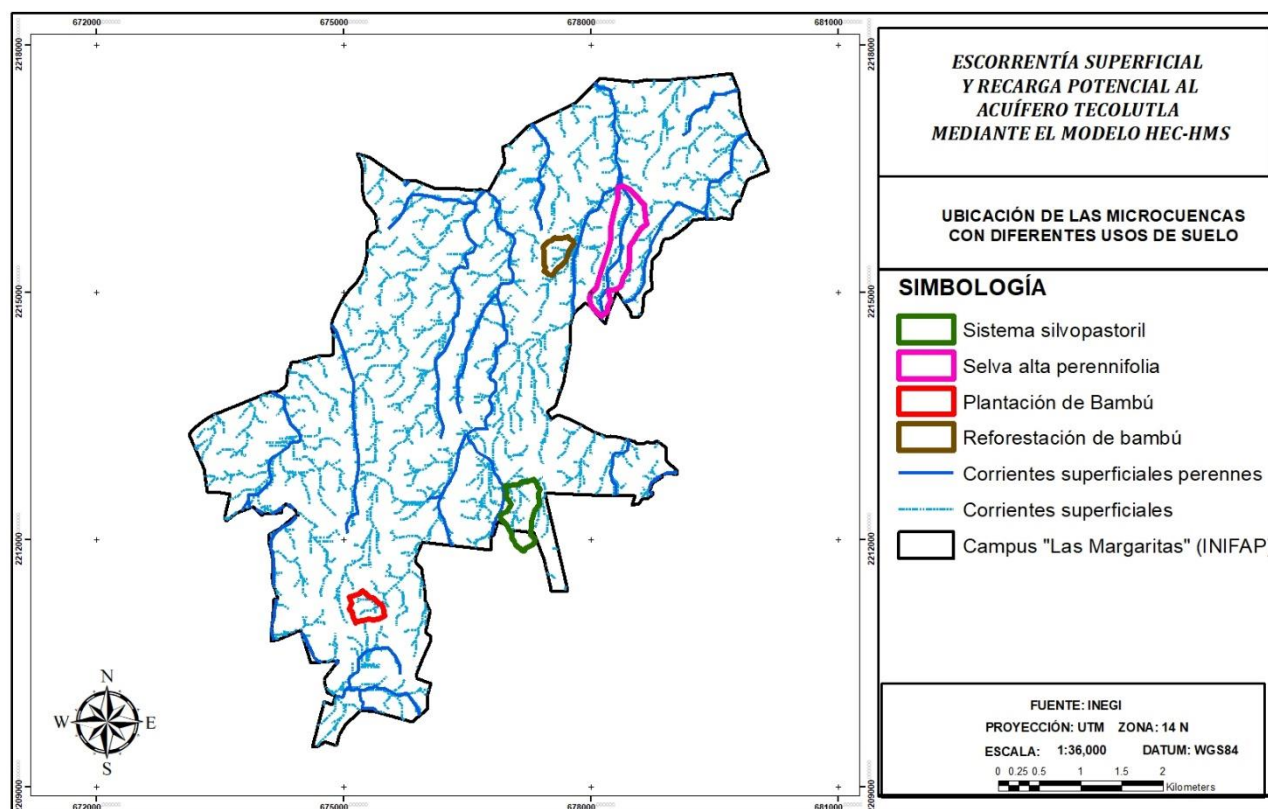


Figura 28. Ubicación de las Microcuencas dentro del predio del Campo Experimental del INIFAP "Las Margaritas".

La microcuenca que tiene como uso productivo el sistema silvopastoril se ubica en la zona suereste del INIFAP campo experimental "Las margaritas" abarcando una superficie de 25.54 ha tiene un perímetro de 2,378.9 m, con suelos de tipo feozem aplico. La microcuenca con uso actual de reforestación de bambú se ubica en la zona noreste, tiene un área de 11 ha, un perímetro de 1,367 m con suelos de tipo regosol eutrico. La microcuenca donde se tiene plantación de Bambú está al sur del predio, abarca una superficie de 10.94 ha, tiene un perímetro de 1,341.21 m, con suelos de tipo regosol eutrico. La microcuenca seleccionada como "área testigo" correspondiente a un sitio conservado que presenta vegetación arbórea de Selva alta perennifolia, se ubica en la zona noreste con un área de 43.90 ha, tiene un perímetro de 3,711.39 y presenta suelos de tipo regosol eutrico (INEGI, 2014) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características de las microcuencas delimitadas.

Microcuenca	Área (ha)	Perímetro (m)	Pendiente promedio (%)	Uso de suelo	Tipo de suelo	Textura	Longitud de la corriente principal (m)	Pendiente promedio del cauce principal (%)
Sistema silvopastoril	25.54	2,378.9	8	Pastizal	Feozem aplico	Franco arenoso	667	8.2
Reforestación	11	1367	25	Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia y bambú	Regosol eutrico	Franco arcillo arenoso	476	14.5
Plantación	10.94	1,341.21	23	Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia y bambú	Regosol eutrico	Franco arenoso	516	13.8
Selva alta perennifolia	43.90	3,711.39	21	Selva alta perennifolia	Regosol eutrico	Franco arenoso	1,789	4.0

Usos de suelo

Para el estudio se identificó dentro del campo experimental del INIFAP “Las margaritas” cuatro microcuencas con diferentes usos de suelo, correspondientes a: sistema Silvopastoril (SP), Reforestación con bambú (RB), plantación de bambú (PB) y selva alta perennifolia (SAP).

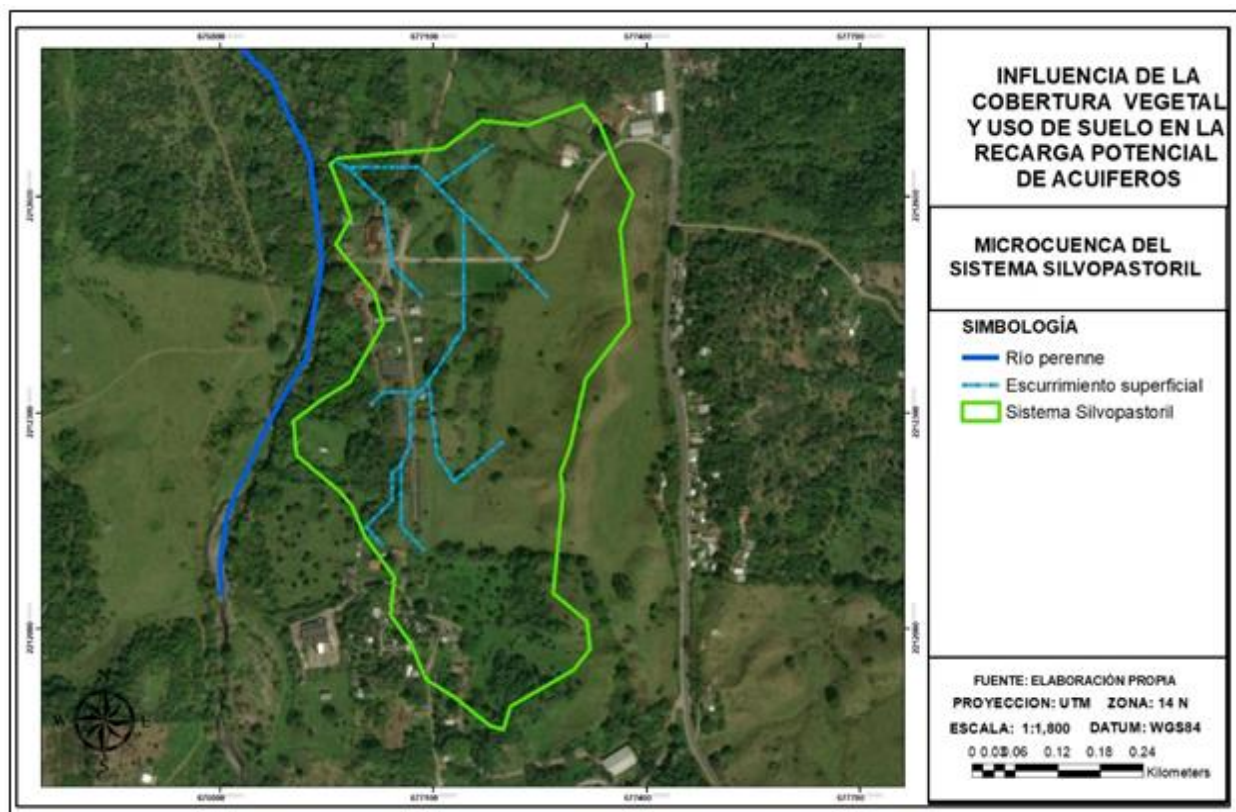


Figura 29. Uso de suelo del sistema agroforestal silvopastoril.

En la figura 29 se muestra el acercamiento de la microcuenca con el uso de sistema silvopastoril, donde se tienen árboles de: *Bursera simaruba*, *Ficus citrifolia*, *Cedrela odorata*, *Gliricidia sepium*, *Croron dracos*, *Ficus obtusifolia* y *Guadua aculeata* (Castro, 2021) como cercos vivos y árboles dispersos, así como y pastos que alimentan el ganado vacuno y equino del lugar. En la imagen se puede observar la vegetación conglomerada, las barreras vivas y las áreas de pastizales.

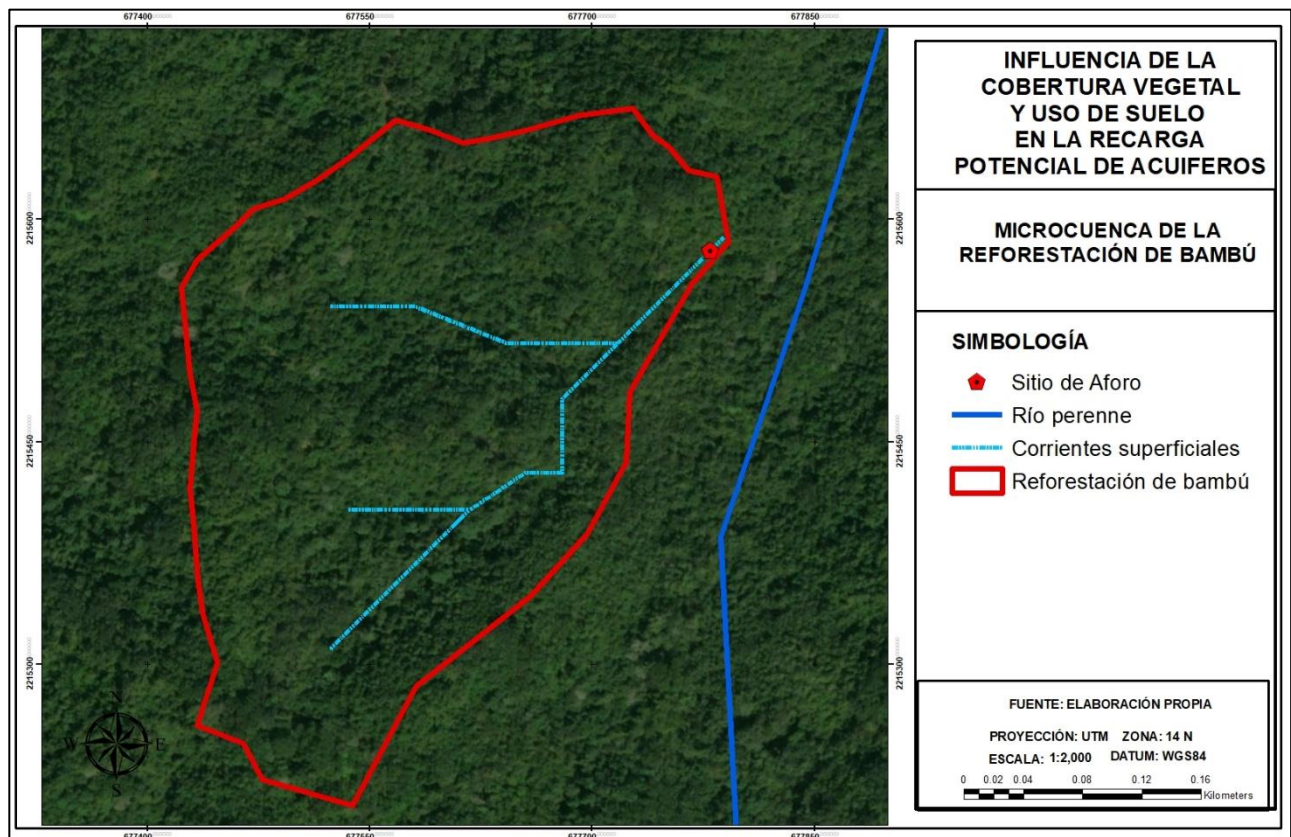


Figura 30. Uso de suelo del área de reforestación de bambú.

En la reforestación con bambú (figura 30) se observa la densa vegetación secundaria de selva alta perennifolia, que se encuentra fragmentada por parcelas de ganadería abandonadas, por lo que la vegetación se encuentra en regeneración, algunas de las especies que se pueden encontrar son: *Guadua aculeata*, *Ficus citrifolia*, *Bambu sp.*, *Quillaja saponaria* (Castro, 2021).

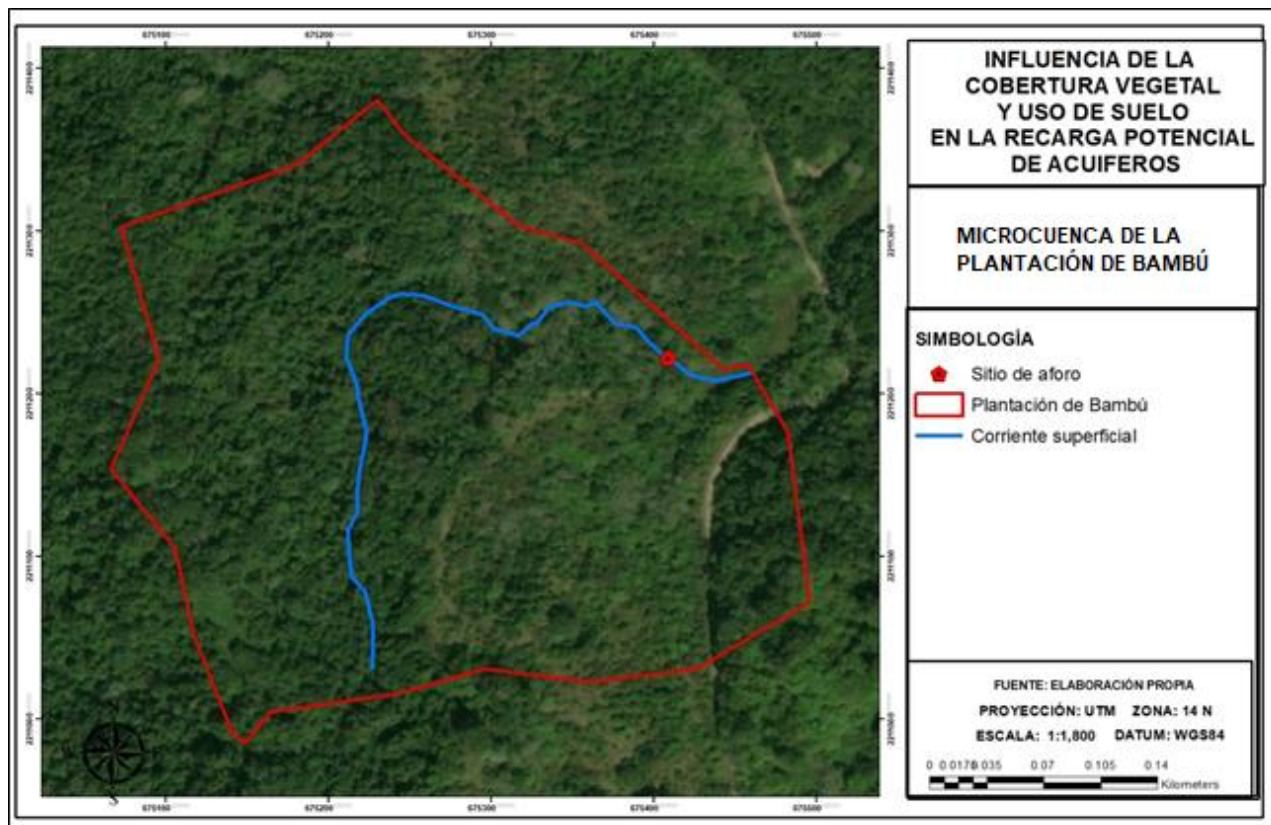


Figura 31. Uso de suelo del área de plantación de bambú.

En la plantación de bambú (figura 31) se observa que existe vegetación secundaria notándose la fragmentación, ocasionada por el uso ganadero actualmente abandonado y el sitio se ha ido regenerando naturalmente por lo que se consideró en un proyecto para plantación con bambú en la mayor parte del área, algunas especies que se registraron son: *Guadua aculeata*, *Pterocarpus hayesii*, *cecropia obtusifolia*, *Heliocarpus mexicanus*, *Matudaea trinervia*, *Cyathea divergens*, *quercus rotundifolia*, *Pinus caribaea*, (Castro, 2021).

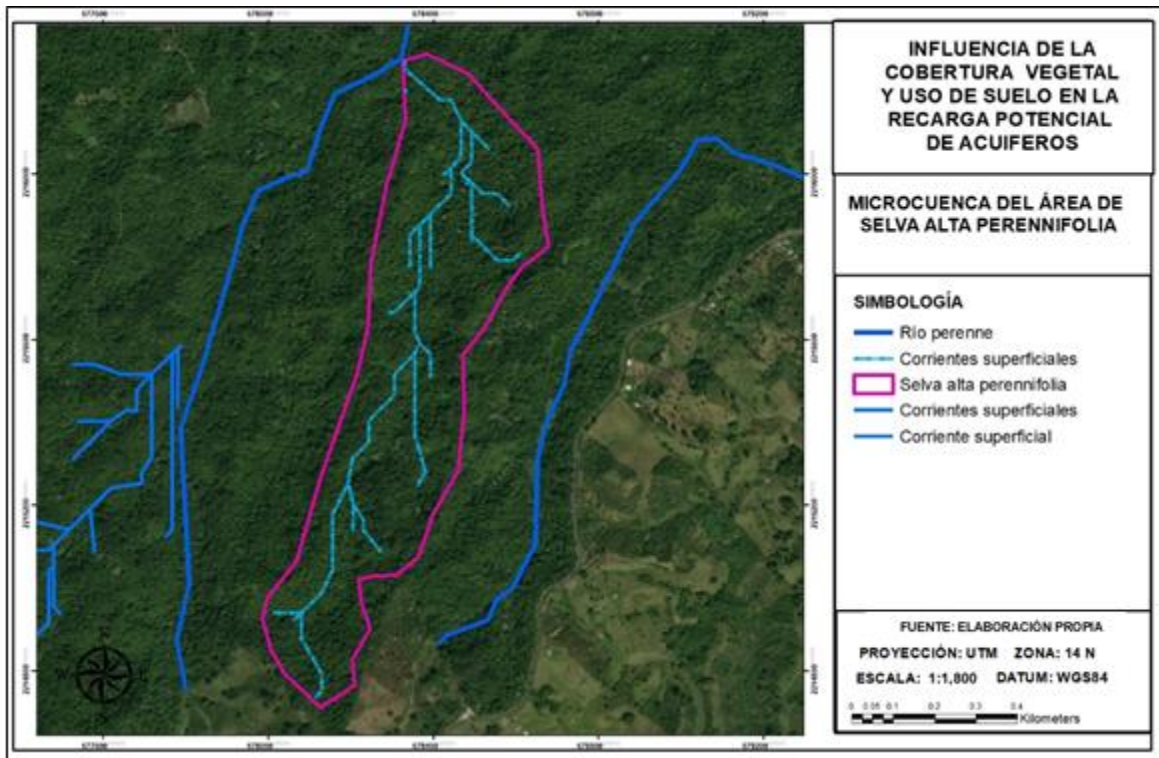


Figura 32. Uso de suelo del área “testigo” Selva alta perennifolia.

Para poder tener una referencia de lo que debería ocurrir en un ecosistema natural de selva alta perennifolia (Figura 32) se consideró un área testigo dentro del predio de las margaritas, en que se presentan especies como: *Guadua aculeata*, *Pterocarpus hayesii*, *cecropia obtusifolia*, *Heliocarpus mexicanus*, *Matudaea trinervia*, *Cyathea divergens*, *quercus rotundifolia*, *Pinus caribaea*, (Castro, 2021).

En la figura 33 se muestran los sitios de aforo donde se observa que en el sistema silvopastoril no presenta un flujo base, mientras que en la reforestación, plantación y selva si observan.



Figura 33. Sitios de medición de escorrentía superficial: a) Sistema silvopastoril, b) reforestación de bambú, c) plantación de bambú y c) selva alta perennifolia.

4.4.3. Modelación de escorrentía superficial con HEC-HMS

Para la modelación de la escorrentía superficial con HEC-HMS se implementó el diagrama que se muestra en la figura 34, donde se presenta el proceso de la modelación hidrológica que se siguió para este estudio. Se definió la serie de tiempo (fecha y hora de inicio y fin) de precipitación y gasto observado cada 10 minutos en el evento de mayor tiempo, y cada cinco minutos en el resto de los eventos. Se definió el método de pérdida de escorrentía correspondiente al SCS Curva numérica y el método de transformación

fue el SCS Hidrograma unitario. En este se define también la superficie de la microcuenca, el número de curva de acuerdo a la humedad antecedente, la abstracción inicial así como el tiempo de retraso. En el modelo se contemplan especificaciones de control para poder ejecutar una simulación apropiada con los rangos de tiempo, posterior a la simulación se deben optimizar los parámetros para poder calibrar el hidrograma simulado con el observado.

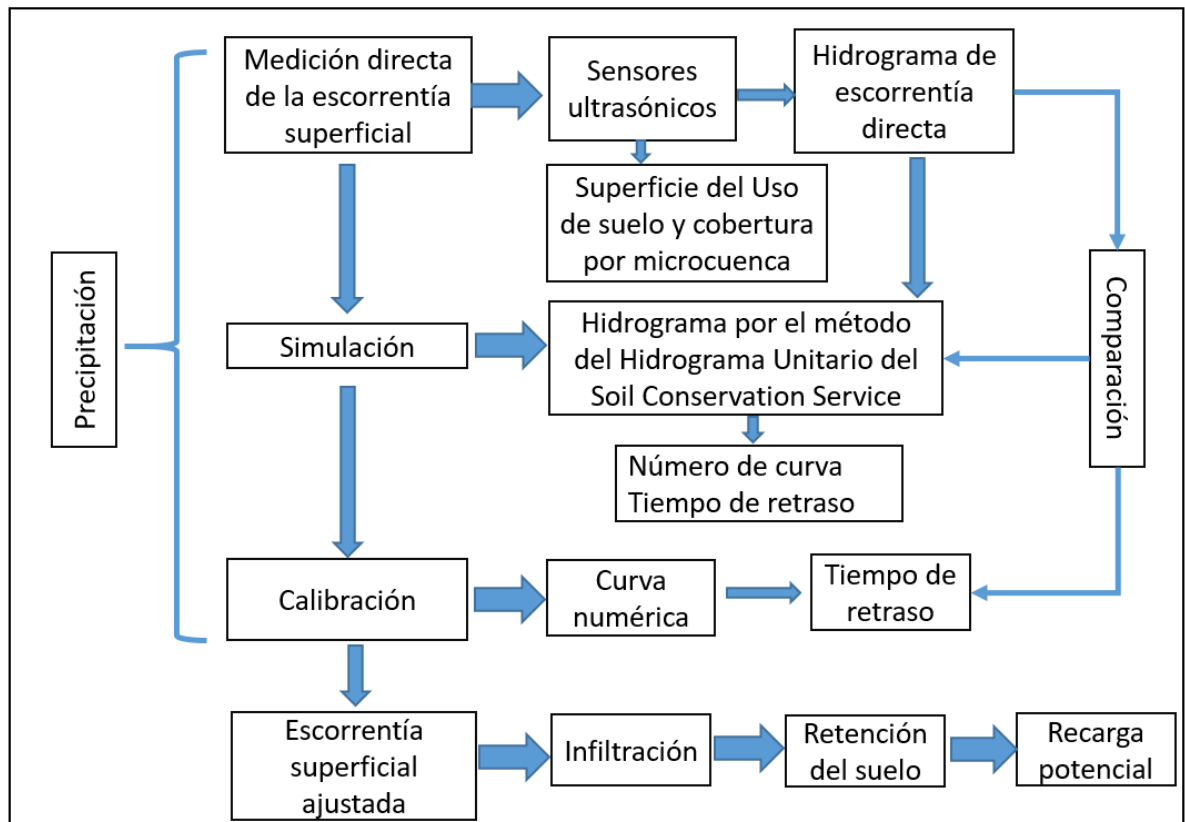


Figura 34. Diagrama de flujo del proceso de modelación hidrológica.

4.4.4. Registro de la lluvia

Para obtener datos de precipitación se instaló un pluviómetro Davis® (Figura 18) automatizado, con una precisión de $\pm 4\%$, con una resolución de 0.2 mm, ubicado en un lugar que es representativo de las cuatro microcuencas de estudio, en el mes de febrero de 2023 y registrar la evolución temporal de la precipitación a cada minuto.



Figura 35. Pluviómetro Davis® automatizado.

La estación automatizada tipo Davis registró datos por casi un año que se muestran en la figura 36 donde se observa que en la fecha entre el 23 y 24 de abril ocurrió un evento de precipitación de 301.6 mm siendo este el evento de mayor registro.

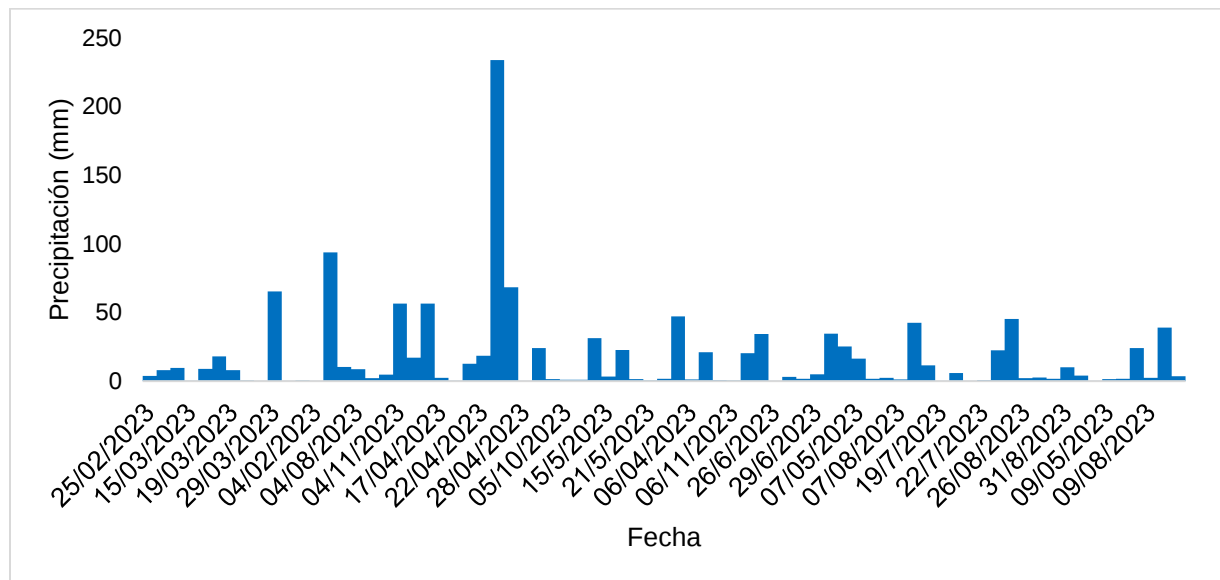


Figura 36. Historial de precipitación.

4.4.5. Obtención del número de curva

Para estimar el escurrimiento de las microcuencas se usó la metodología propuesta en el año 1972 por el extinto Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS), en el que se emplea un número de curva (CN, por sus siglas en inglés), cuya ecuación es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (9)$$

donde Q es la precipitación efectiva o escorrentía superficial (mm); P es la lámina precipitada (mm); y S es el potencial máximo de retención del suelo (mm), calculado como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (10)$$

donde el número de curva CN toma valores de 0 a 100, donde el 0 son condiciones de alta permeabilidad y 100 representa impermeabilidad. El CN se elige en función del uso de suelo, cobertura vegetal, condición hidrológica y grupo de suelo, según las tablas del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA –NRCS, 2008); Feldman, 2000).

El CN se corrigió por la condición de humedad antecedente (Chow, Maidment y Mays, 1994). Si la precipitación acumulada de los cinco días previos al evento analizado fue menor que 12.7 mm, se considera condición de humedad antecedente seca y se usa la ecuación 11; pero si resulta mayor que 38.1 mm es una condición de humedad antecedente húmeda y se utiliza la ecuación 12 (Chow et al., 1988); y si resulta entre 12.7 y 38.1 mm se considera condición de humedad antecedente intermedia y en este caso el valor de CN no se corrige:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (11)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (12)$$

donde CN(II) se obtiene de tablas [USDA –NRCS, 2004].

4.4.6. Implementación del hidrograma unitario del SCS

Para convertir la lámina de escurrimiento en un hidrograma de escurrimiento directo (evolución temporal del caudal) se usó el hidrograma unitario suavizado del extinto servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Chow et al., 1988). Para su aplicación se calculó el tiempo de retraso en función del tiempo de concentración para cuencas no aforadas sugiere la ecuación (13) (Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) (1972), (USDA –NRCS, 2008):

$$t_{lag} = 0.6t_c \quad (13)$$

donde t_{lag} es el tiempo de retraso y t_c es el tiempo de concentración, calculado con la ecuación de Kirpich (1940), citado por (USDA –NRCS, 2008):

$$t_c = 0.02 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (14)$$

donde L es la longitud del cauce principal de la cuenca (m) y S es la pendiente del cauce principal.

4.4.7. Registro de los Hidrogramas de esorrentía medidos

Sobre los cauces principales en las salidas de las cuatro microcuencas de estudio se registraron los niveles del agua por medio de sensores ultrasónicos y de presión, para las fechas: 23-24 de abril, 25 de agosto y 9 de septiembre de 2023. Las siguientes características de cada microcuenca son importantes para conocer el comportamiento de los hidrogramas resultantes.

En la figura 37 se muestra la microcuenca del uso correspondiente al sistema silvopastoril donde la pendiente promedio de la microcuenca es del 8%, presenta una corriente superficial principal que mide 667 m y el cauce principal tiene un 8.2% de pendiente. La sección transversal del sitio de aforo del área es de 0.534 m², un perímetro de mojado de 2.220 m, un tirante máximo de 0.64 m y un tirante medido de 0.604 m. el punto de aforo se ubicó al final de la corriente principal que reúne pequeños escurrimientos de tipo intermitente, que en conjunto alimentan a un río más grande ubicado más adelante del punto de medición. Dentro del predio se presenta un pequeño manantial que mantiene actualmente húmedo el suelo en la zona media de la microcuenca al ser pequeño se dispersa y proporciona agua al ganado.

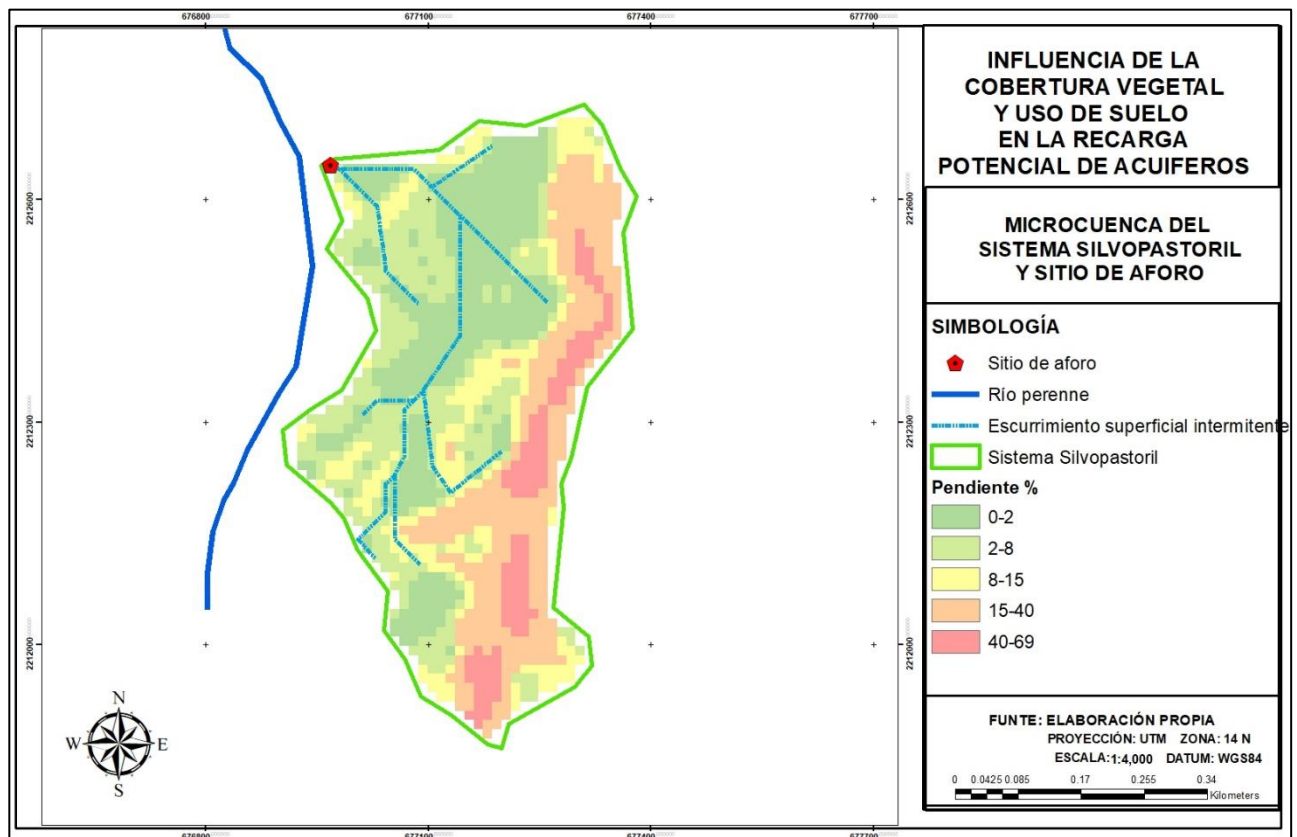


Figura 37. Microcuenca del sistema agroforestal silvopastoril.

En la figura 38 se muestra la microcuenca de reforestación de bambú donde la pendiente promedio de la microcuenca es del 25%, el cual está conformado por pequeñas corrientes superficiales que alimentan una pequeña corriente principal que mide 476 m, y la pendiente promedio del cauce es de 14.5%. Y el sitio de aforo se ubicó en la zona baja donde confluyen los escurrimientos superficiales que definen la microcuenca. La sección transversal del sitio de aforo del área de reforestación tiene un área de 13.441 m², un perímetro de mojado de 15.943 m, un tirante máximo de 1.672 m y un tirante medido de 1.670 m. Durante las mediciones se apreció un escurrimiento superficial base con una altura de 3 a 11 cm que se seca en temporadas muy secas, de acuerdo al recorrido realizado.

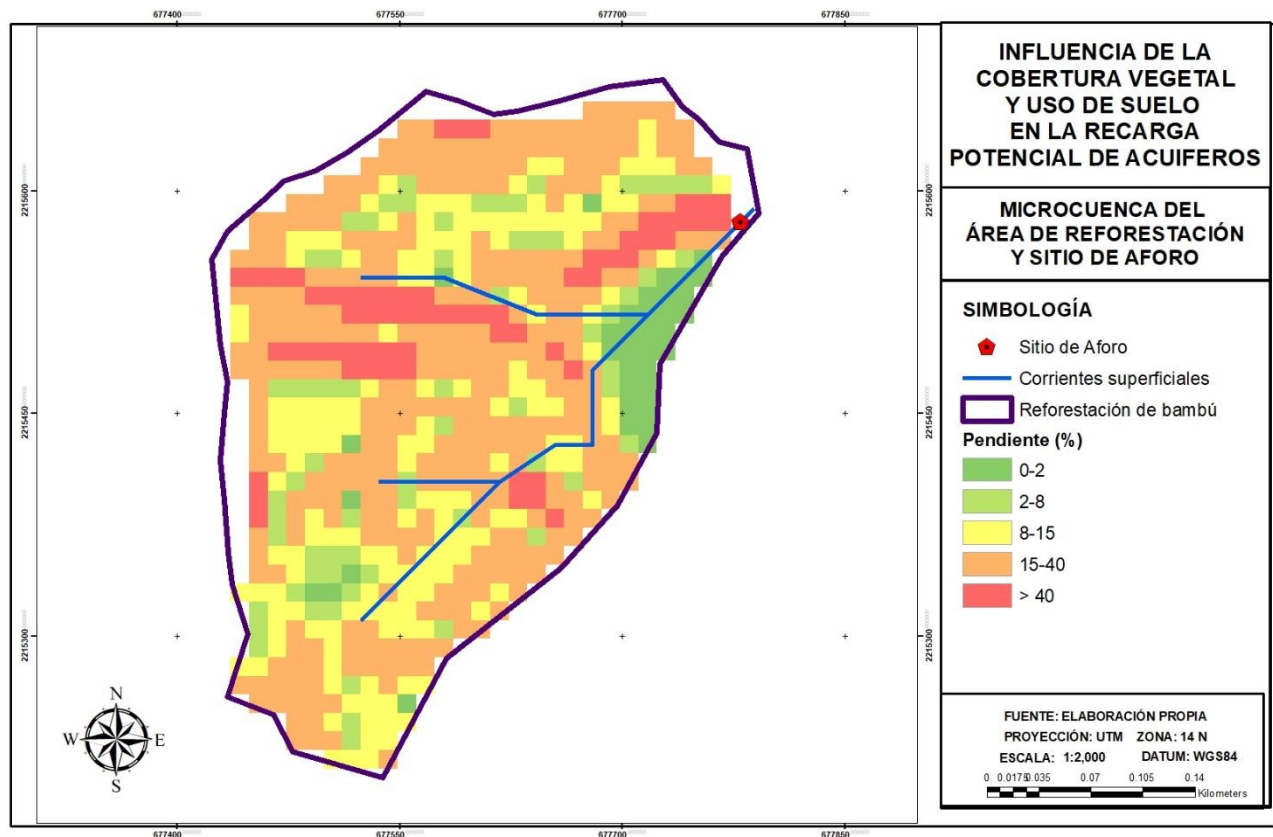


Figura 38. Microcuenca del área de reforestación.

La Microcuenca del área de plantación de Bambú (Figura 9) tiene una pendiente promedio de 23%, definido por varias corrientes superficiales y una principal pequeña que tiene una longitud de 516 m con un promedio de 23% de pendiente. El sitio de aforo se ubicó en el sitio de reunión de las corrientes superficiales. La sección transversal del sitio de aforo de plantación, tiene un área de 10.17 m², un perímetro de mojado de 19.8185 m, un tirante máximo de 1.930 m y un tirante medido de 0.604 m. Durante la mayor parte del año durante las visitas a campo se observó que la corriente principal tiene un flujo base con una altura de 4 a 7 centímetros de altura que se llega a secar en temporadas muy secas.

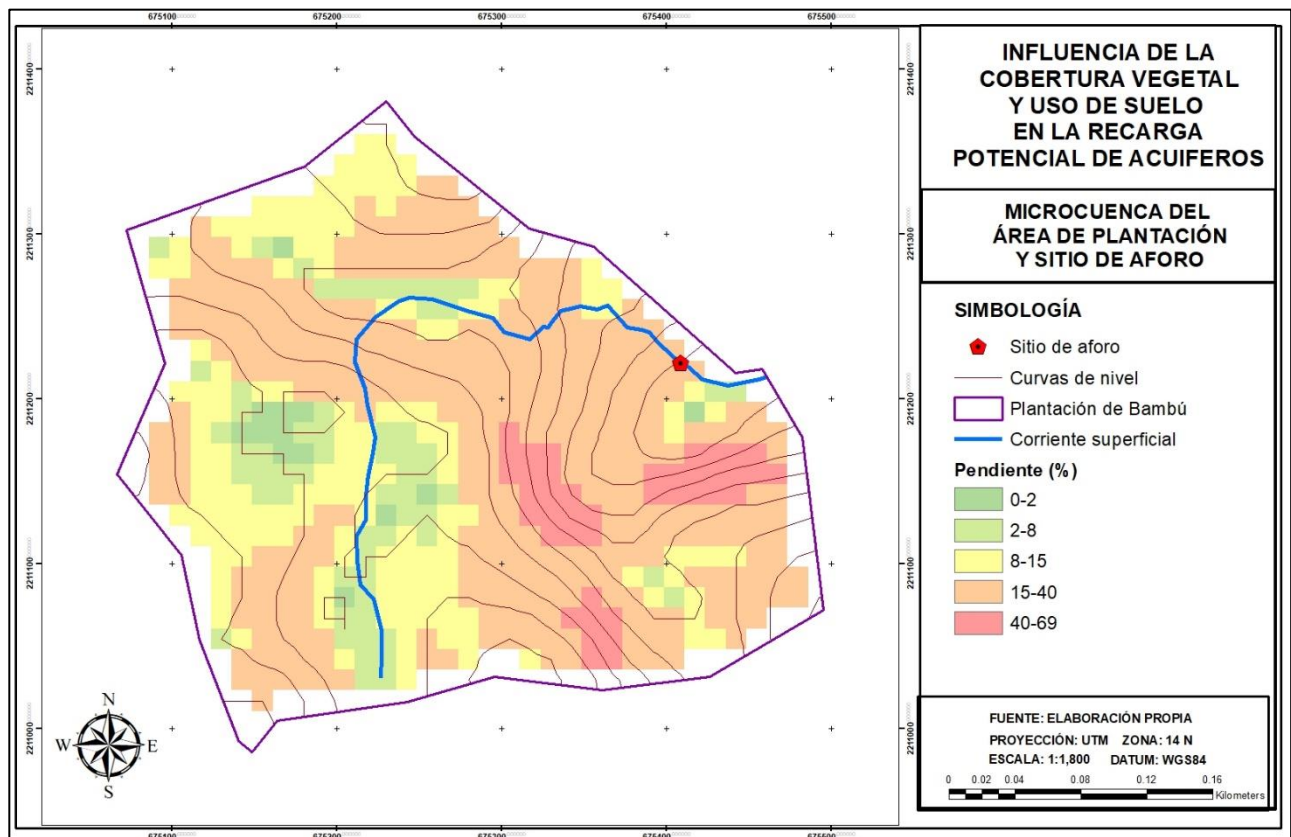


Figura 39. Microcuenca del área de plantación de Bambú.

La microcuenca presenta vegetación de selva alta perennifolia (Figura 10), la pendiente promedio de la microcuenca es de 21%, conformado por varias corrientes pequeñas superficiales intermitentes y perennes que contribuyen a la corriente principal de tipo perenne cuyo cauce principal tiene una pendiente promedio del 4%. La sección transversal del sitio de aforo de la Selva alta perennifolia tiene un área de 3.259 m², un perímetro de mojado de 7.135 m, un tirante máximo de 1.054 m y un tirante medido de 1.049 m. En el sitio la corriente principal aforada presentó un escurrimiento superficial de tipo perenne en el que se estuvo midiendo una altura de caudal de entre 14 y 12 cm de altura.

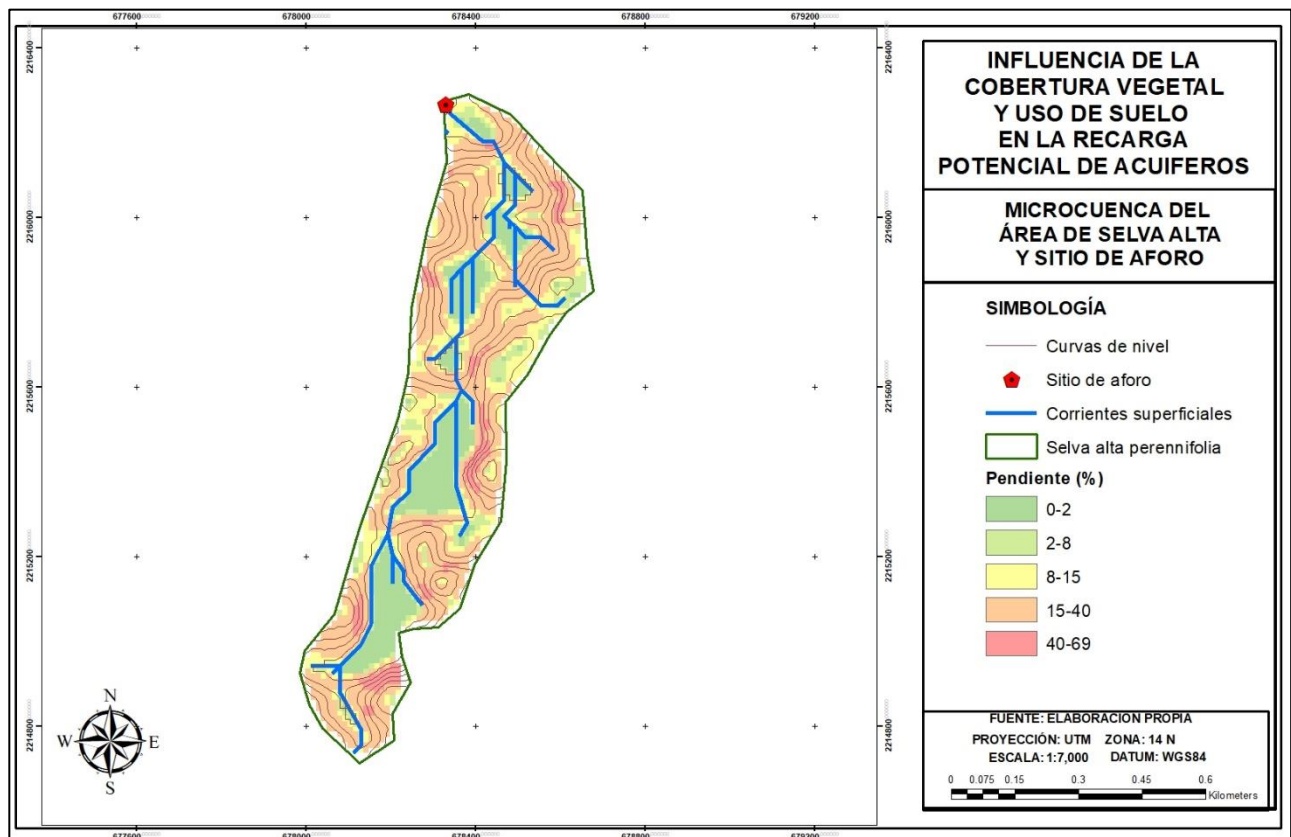


Figura 40. Microcuenca del sitio testigo de Selva alta perennifolia.

El caudal se obtuvo con ecuaciones de calibración caudal–tirante, las cuales se generaron a partir del método sección-velocidad. La sección transversal y la pendiente del fondo del cauce de los sitios de aforo se obtuvo con un equipo topográfico. La velocidad media del flujo se obtuvo con la ecuación de Manning y su coeficiente de fricción se asignó el valor sugerido por Ven Te Chow (1994) de acuerdo a las condiciones físicas de las paredes del cauce. Las ecuaciones de calibración de cada uno de los sitios se muestran en las figuras 41, 42, 43 y 44.

Los hidrogramas de esorrentía generados por los eventos de precipitación se obtuvieron ingresando los tirantes en las ecuaciones de calibración correspondientes. Los tirantes se obtuvieron con estaciones automatizadas, integradas por un sensor de presión o ultrasónico, una placa arduino Uno, tarjeta micro-SD para guardar información, reloj para sincronizar la fecha y hora de las lecturas, baterías para almacenar y alimentar el equipo en horas sin luz solar y con un panel solar (Figura 45). los equipos de medición se

probaron y calibraron previo a su instalación en el sitio de aforo y en algunos casos se recalibraron en el sitio de instalación.

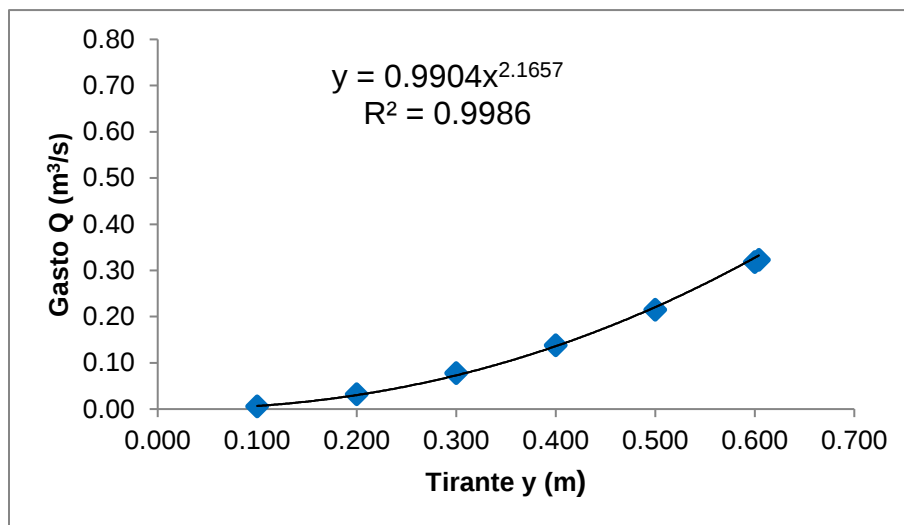


Figura 41. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área del sistema silvopastoril.

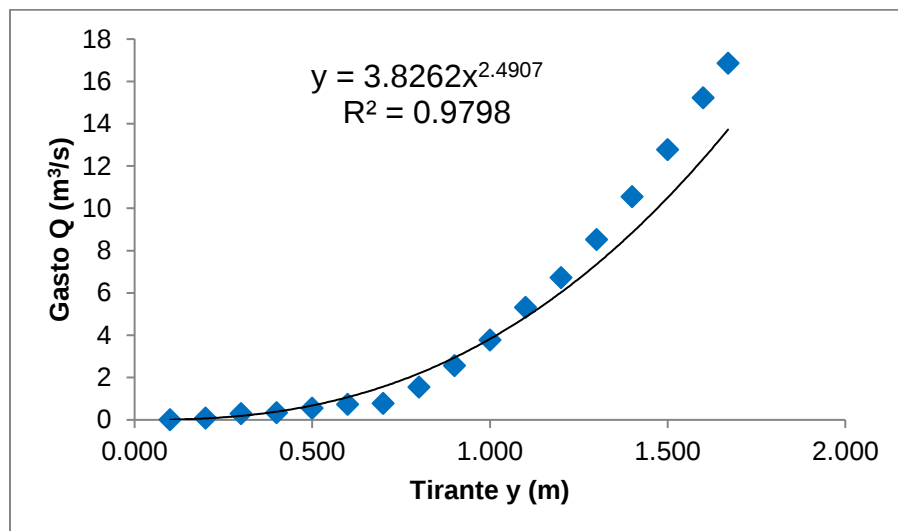


Figura 42. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de reforestación.

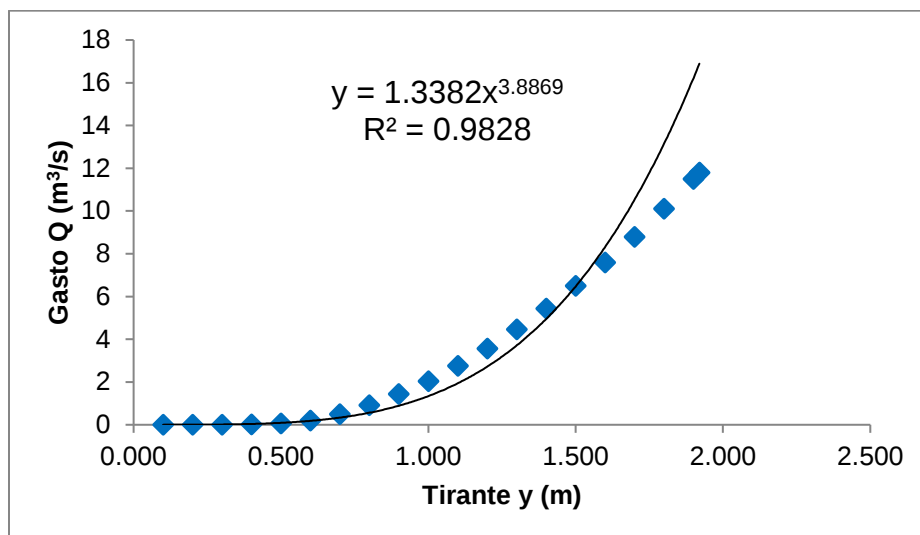


Figura 43. Ecuación de calibración caudal-tirante para el área de plantación de bambú.

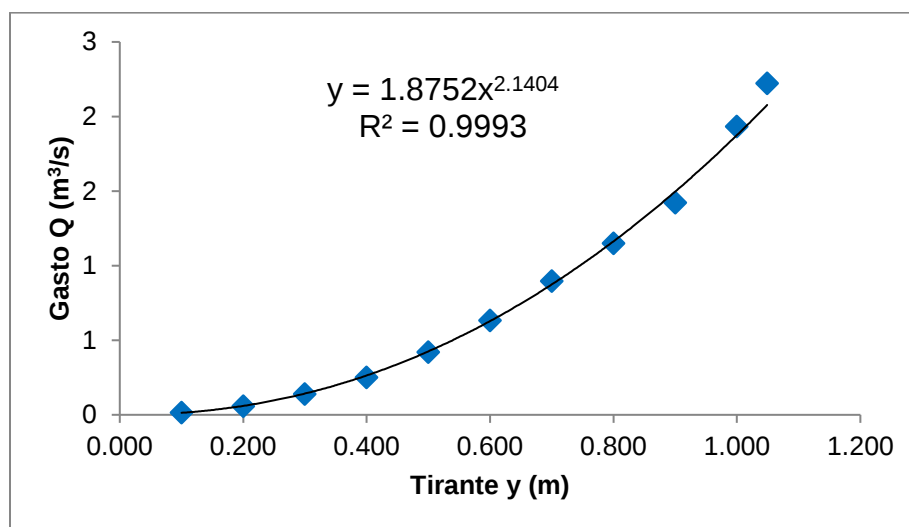


Figura 44. Ecuación de calibración de selva alta perennifolia.

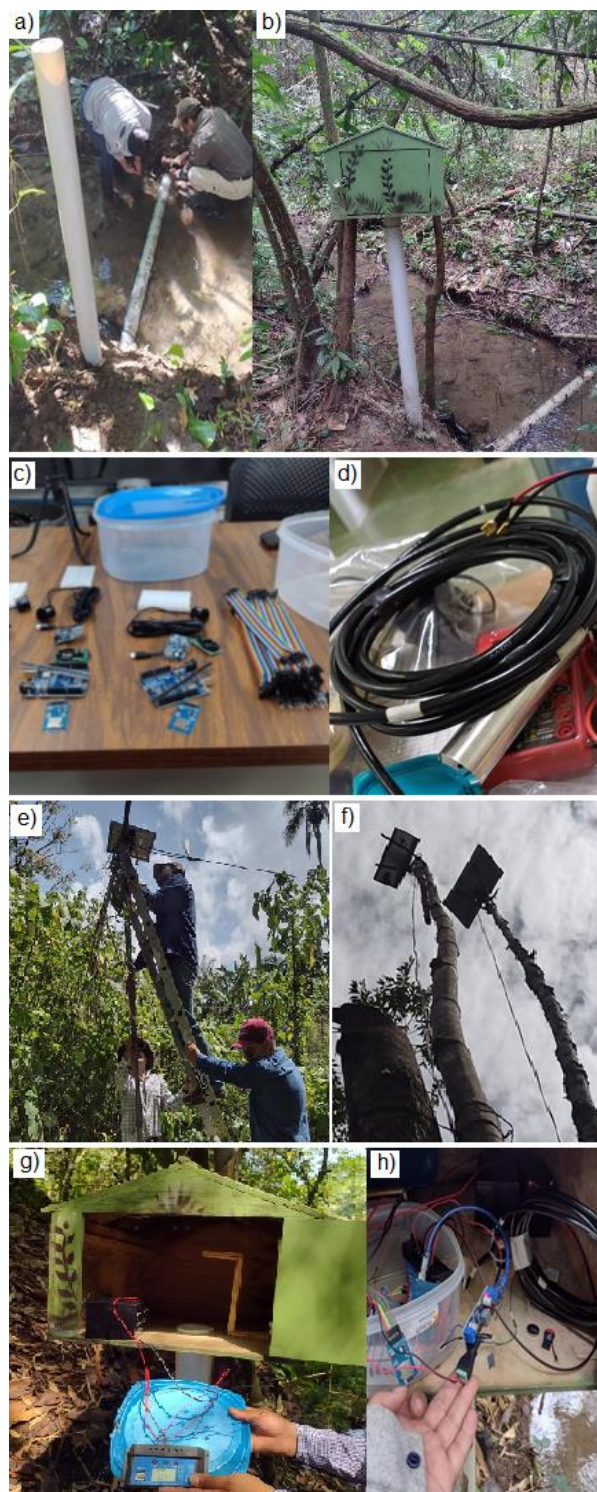


Figura 45. Equipo de medición (a) instalación de tubos de pvc; b) instalación de caseta; c) sensor ultrasónico; d) sensor de presión; e) instalación de panel solar; f) paneles solares; g) batería con equipo ultrasónico; h) equipo con sensor de presión.

En el modelo HEC HMS, se subieron los datos de precipitación obtenidos por la estación de cada evento lluvia-escorrentía con un intervalo de 10 y cinco minutos, en las especificaciones de control se definieron la fecha, la hora de inicio y fin del cálculo de la simulación (Cuadro 6).

Cuadro 6. Eventos de lluvia evaluados.

Evento	Fecha
1	23-24 de abril del 2023
2	25 de agosto del 2023
3	9 de septiembre del 2023

Se ejecutó el programa para obtener la escorrentía con las condiciones dadas y se obtuvieron los eventos sin calibrar y se compararon con la escorrentía medida con el sensor ultrasónico y de presión, obteniendo una curva que no se ajustaba.

4.4.8. Calibración del modelo HEC-HMS

La calibración del modelo HEC-HMS consiste en el ajuste de los valores de los número de curva y los tiempos de retraso de las cuatro microcuencas de estudio, para minimizar los errores entre los hidrogramas observados y simulados (Janicka, et al., 2023; Feldman, 2000).

4.4.9. Evaluación del modelo

Para evaluar el desempeño del modelo se utilizó el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE). El índice de eficiencia *NSE* se define como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_s^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2} \quad (15)$$

donde n es el número de datos; Q_o^i es el caudal observado en el *i*-ésimo tiempo; Q_s^i es el caudal simulado; y $\bar{Q}_o$ es el caudal medio observado.

Se usó el criterio de Molnar (2011) para calificar el desempeño de la modelación, quien lo califica según el valor del índice *NSE*: es excelente si es mayor que 0.8, es muy bueno si se encuentra entre 0.6 y 0.8, es buena si encuentra entre 0.4 y 0.6, satisfactorio si resulta entre 0.2 y 0.4, e insuficiente si resulta menor que 0.2.

El *RMSE* es una medida de calidad de predicción que muestra hasta qué punto las predicciones de diferentes modelos hechas se desvían de los valores medidos reales y su expresión matemática es (Bennett et al 2013):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Q_s - Q_o)^2}{n}} \quad (16)$$

donde *n* es el número de observaciones, *Q_s* es el *i*-ésimo valor simulado y *Q_o* es el *i*-ésimo valor observado.

4.4.10. Recarga potencial

La recarga potencial al acuífero se calculó mediante la comparación de la lámina infiltrada y la capacidad de retención de los suelos. La infiltración se obtuvo por la diferencia de la precipitación menos el volumen del escurrimiento directo en mm, obtenido este último de la simulación optimizada con el modelo HEC-HMS. El modelo HEC-HMS resta el volumen de agua interceptada, infiltrada, almacenada, evadida o transpirada, de la precipitación para obtener la lámina de escorrentía directa.

Si la lámina de infiltración es mayor que la capacidad de retención del suelo, entonces la diferencia entre sus valores será la recarga potencial al acuífero; de lo contrario la recarga potencial es nula.

La capacidad de retención del suelo (*CRS*) en milímetros se calcula con la siguiente Ecuación:

$$CRS = (\theta_{cc} - \theta_0) \times P_r \quad (17)$$

Donde: θ_{cc} es el contenido de humedad a capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_0 es el contenido de humedad inicial ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); P_r es la profundidad de raíz (mm).

La humedad inicial se consideró igual que la humedad a punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) dado que los eventos de escorrentía considerados fueron al inicio del periodo de lluvias. Para conocer los valores de los parámetros de las ecuaciones, se hizo la revisión de literatura y se cotejó en campo por medio del muestreo de suelo en los cuatro sitios de uso de suelo y cobertura y se determinó su textura por el método de bouyoucos en laboratorio. De acuerdo a la literatura, en el área de estudio se han registrados suelos de textura arcilloso, franco arcilloso y arenoso arcilloso, reportando un contenido de materia orgánica de 5.2% (Alarcón 2015 & Clavijo 2016). Sin embargo, de acuerdo al análisis de laboratorio se identificó un contenido de materia orgánica de 3.35 en el área silvopastoril y el contenido más bajo fue de 0.71% registro en el área testigo de selva alta perennifolia, lo cual está acorde con Leul et al., 2023.

Por otra parte, para conocer la densidad aparente se usó el método de la probeta y para el punto de marchitez permanente (pmp) y capacidad de campo (cc) se tomaron los sugeridos por (Saxton et al., 2006), se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 7. Valores de Materia orgánica, Punto de marchitez permanente y Capacidad de campo.

Microcuenca	Clase textural	Humedad inicial (Cm ³)	Materia orgánica (%)	Densidad aparente g cm ⁻³	Conductividad hidráulica saturada Mm h ⁻¹	θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)
Silvopastoril	franco arenoso	0.4451	3.35	0.86	75.61	0.165	0.477
Reforestación	Franco arcillo arenoso	0.4699	2.06	0.78	10.11	0.271	0.432
Plantación	franco arenoso	0.4451	2.38	0.87	54.38	0.169	0.446
Selva alta perennifolia	Franco arenoso	0.4250	0.71	0.98	28.95	0.171	0.399

4.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la obtención de la simulación del escurrimiento en el programa de HEC-HMS se implementaron los datos obtenidos en la medición directa del escurrimiento superficial por evento de lluvia, que se presentan en el cuadro 8 por sistema productivo, donde se observa que en el evento de mayor precipitación de 301.6 mm la mayor lámina de escorrentía ocurrió en el sistema silvopastoril con 14.77 mm, en los eventos con

precipitación de 45.2 y 39 mm registró una lámina de 0.604 y 0.3732 correspondientemente, lo cual es mayor que en los sistemas que tienen más cobertura arbórea, como es en el área de reforestación, donde la escorrentía en el evento de mayor precipitación (301.6) tuvo una lámina de 0.029 y en la plantación de bambú para el evento de 45.2 mm de lluvia la lámina fue de 0.0802 y en la selva alta perennifolia fue de 0.046 mm.

Cuadro 8. Volumen y láminas de escurrimiento de los sistemas de producción.

Fecha-Usos de suelo/Volumen y lámina de agua	23 y 24 de abril del 2023		25 de agosto del 2023			9 de septiembre del 2023
	Silvopastoril	Reforestación	Silvopastoril	Plantación	Selva alta perennifolia	Silvopastoril
Lámina precipitada (mm)	301.60	301.60	45.20	45.20	45.20	39.0
Volumen de esc. Superficial (m ³)	3772.42	10.641	154.29	8.774	95.32	95.32
Lamina de escorrentía (mm)	14.77	0.029	0.604	0.0802	0.046	0.3732
Lámina de escorrentía unitaria (mm/ha)	0.5783	0.0008	0.0236	0.0073	0.0010	0.0146
Caudal pico (m ³ /s)	0.4621	0.2139	0.0592	0.0020	0.0034	0.0420

4.5.1 Modelación de la escorrentía superficial

En figura 46 se muestran las fechas de la precipitación evaluada y las de cinco días previos a esta, verificando con ello que el antecedente de humedad, previa a la medición del escurrimiento superficial.

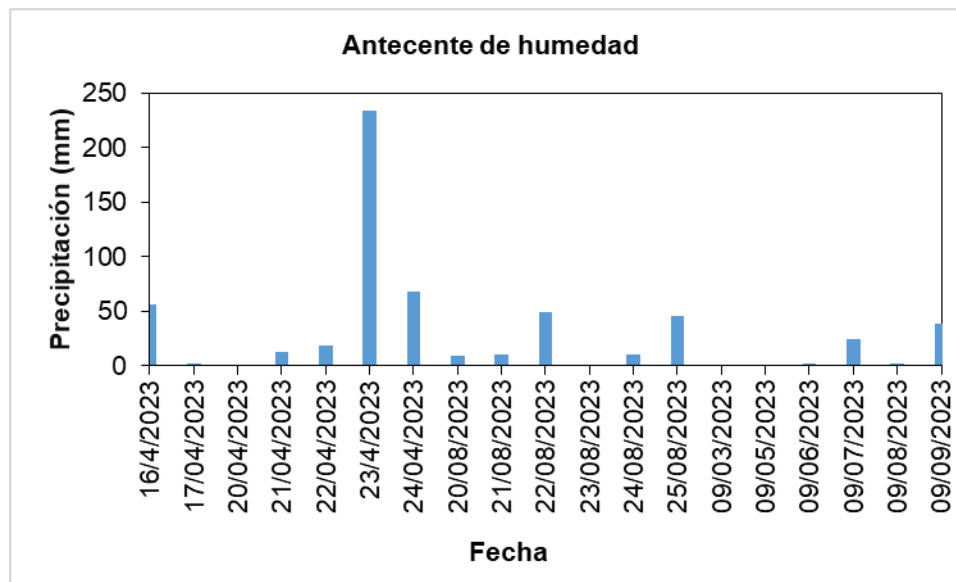


Figura 46. Antecedente de humedad registrado.

Una vez obtenido el antecedente de humedad se alimentó el modelo de HEC-HMS con los parámetros: fecha, tiempo de retraso, abstracción inicial y de la curva numérica estimada para cada sistema productivo o uso de suelo y cobertura que se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9. Parámetros para alimentar el modelo HEC-HMS.

Uso de suelo y cobertura	Fecha	Superficie (km ²)	Tiempo de retraso (minutos)	abstracción inicial (mm)	Número de curva (antecedente húmedo)
Sistema silvopastoril	23-	0.2554	4.6900	18.7900	86.1500
Reforestación de bambú	24/04/2024	0.1100	2.9100	21.7700	84.2900
Sistema silvopastoril		0.2554	4.6900	18.7900	86.1500
Plantación de Bambú	25/8/2024	0.1094	3.1600	41.5600	73.7600
Selva alta perennifolia		0.4390	13.2100	41.5600	73.7600
Sistema silvopastoril	9/9/2024	0.2554	4.6900	18.7900	53.1737

Posterior a la alimentación del programa para la simulación en HEC-HMS, se obtuvieron las gráficas que se compararon con los datos observados en campo, en la Figura 47 a) silvopastoril y b reforestación) correspondientes al evento de lluvia del 23 y 24 de abril. Figura 48 a) Sistema silvopastoril b) Plantación de bambú c) Selva alta perennifolia del evento del 25 de agosto y la Figura 49 corresponde al evento de 9 de septiembre del 2023. En las gráficas se observa que la simulación no representa la realidad. El cuadro

10 presenta la bondad de los modelos sin calibrar comprobándose con los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe, donde la bondad de ajuste de los eventos fue insuficiente. Lo cual podría deberse a la variabilidad de algunos parámetros relacionado con las características del suelo, topografía, precipitación, humedad precedente.

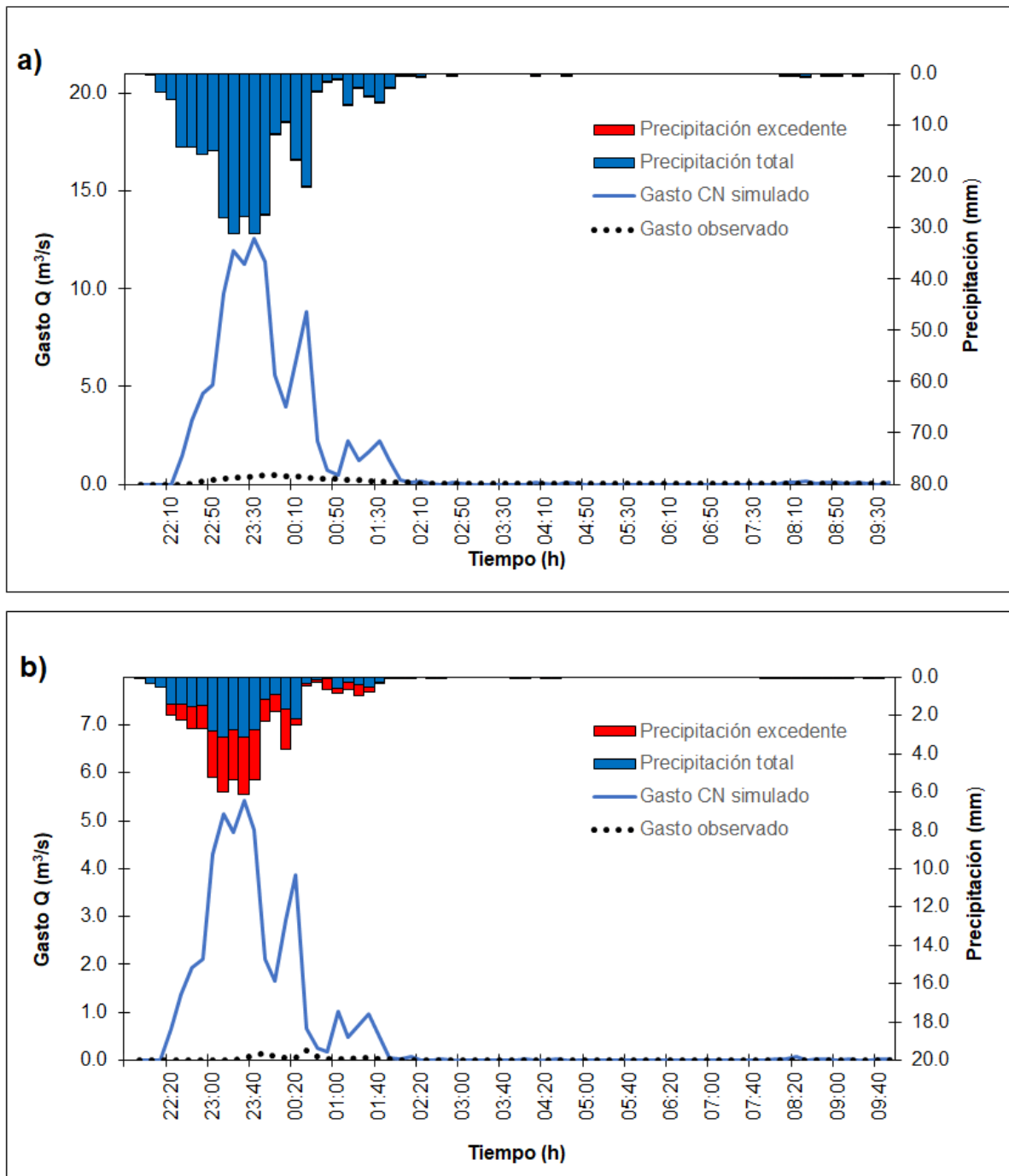


Figura 47. Caudal simulado en el HEC-HMS y observado el 23 y 24 de abril del 2023, en los sistemas de:
a) Sistema silvopastoril y b) Área de forestación de bambú.

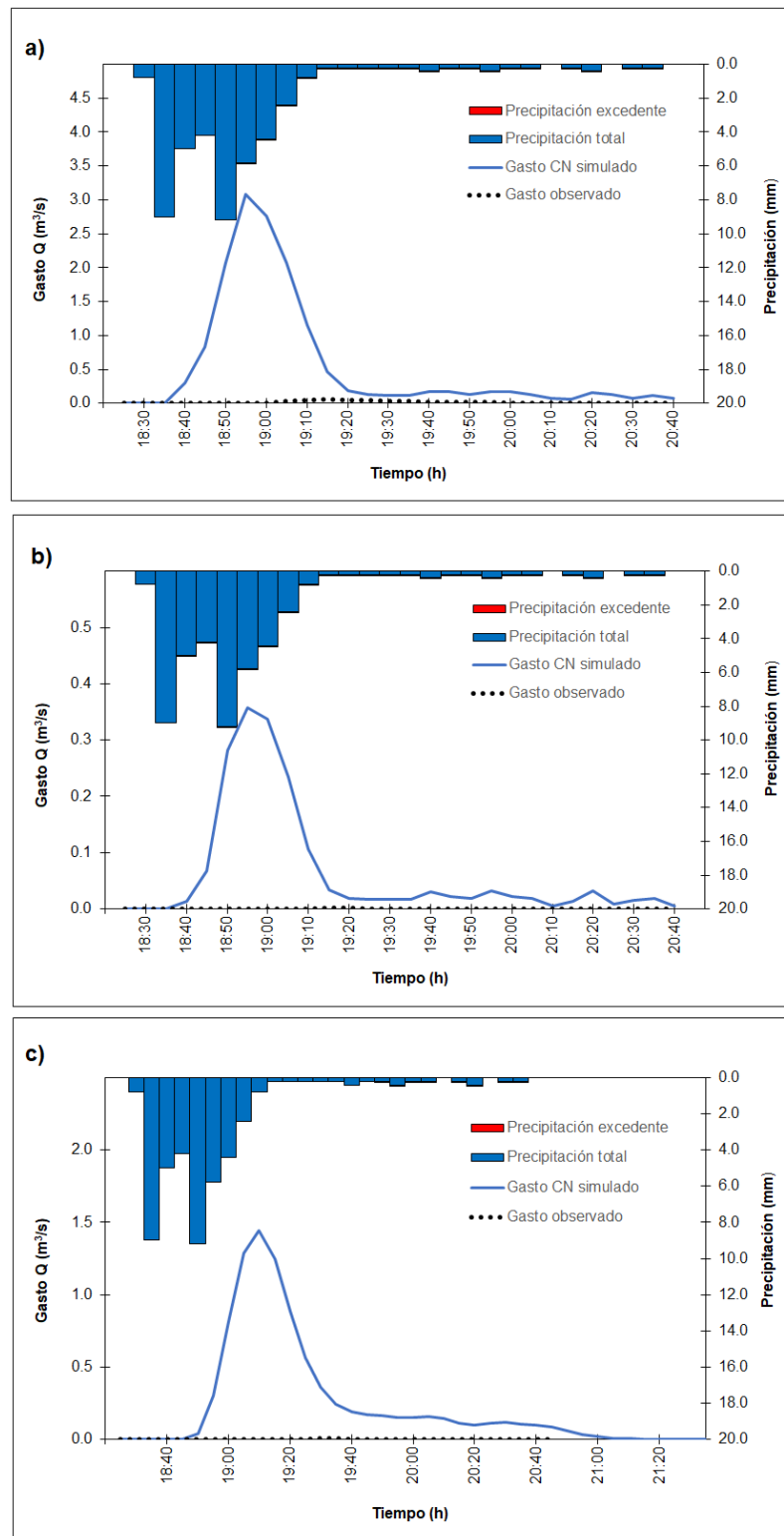


Figura 48. Caudal simulado en el HEC-HMS y observado el 25 de agosto del 2023, en los sistemas de: a) Sistema silvopastoril y b) plantación de bambú y c) “área testigo” de Selva alta perennifolia.

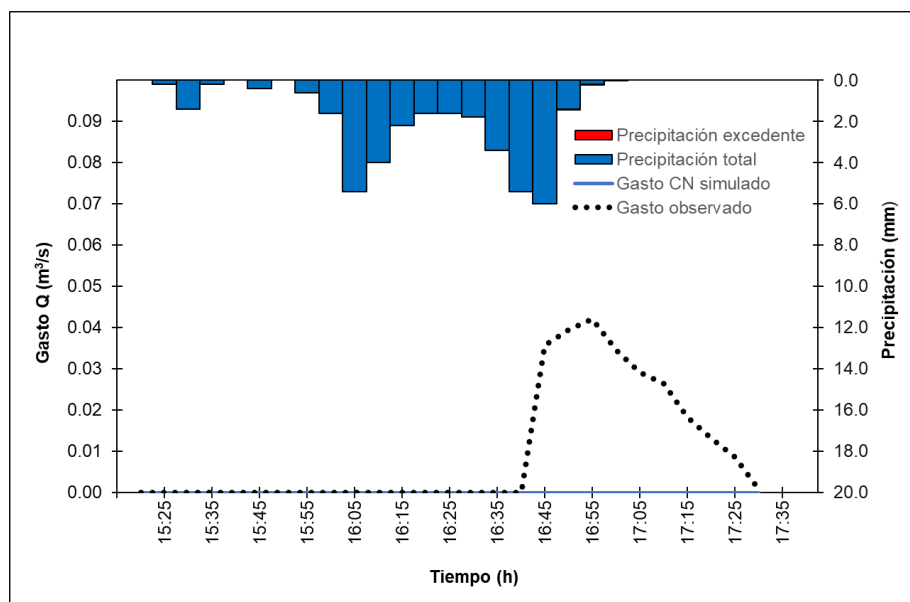


Figura 49. Caudal simulado en el HEC-HMS y observado el 9 de septiembre del 2023, en el sistema Sistema silvopastoril.

Cuadro 10. Coeficiente de Nash-Sutcliffe de las simulaciones sin calibrar.

Uso de suelo y cobertura	Fecha	Índice de Nash-Sutcliffe
Sistema silvopastoril	23-24/04/2023	-646.017
Reforestación de bambú	23-24/04/2023	-1554.03
Sistema silvopastoril	25/08/2023	-7784.495
Plantación de Bambú	25/08/2023	-2932.673
Selva alta perennifolia	25/08/2023	-184067.46
Sistema silvopastoril	9/9/2023	-2.7340

4.5.2 Calibración de la escorrentía superficial

Durante la calibración se atribuyen los parámetros para la obtención del escurrimiento superficial, en el que se van ajustando los parámetros requeridos para obtener los resultados medidos directamente en campo, y con ello se actualiza un modelo particular de un área particular (Vilchis, 2015). Para las microcuencas con diferente uso de suelo y cobertura se obtuvieron las determinaciones optimizadas con los datos observados obteniendo las siguientes figuras: 50 a) silvopastoril y b) reforestación), para el evento del 23 y 24 de abril del 2023, Figura 51 a) Sistema silvopastoril b) Plantación de bambú c)

Selva alta perennifolia y la figura 52 del sistema silvopastoril del evento de 9 de septiembre del 2023. En el cuadro 12 se muestra la bondad de ajuste de los modelos posterior a la calibración mediante el coeficiente de Nash- Sutcliffe en el que se observa que el ajuste fue bajo con valores positivos en la mitad de los sistemas productivos y con valores negativos en la otra mitad, lo que podría deberse a la variabilidad de la topografía, pendiente, tipo de suelo y a que la distribución de precipitación es desigual e influye significativamente en cada microcuenca (Imran et al., (2024). Por lo que la ecuación de la curva numérica con antecedente de humedad podría haber sido subjetiva. Para obtener mejores resultados se requerirá la medición directa de la precipitación en cada microcuenca.

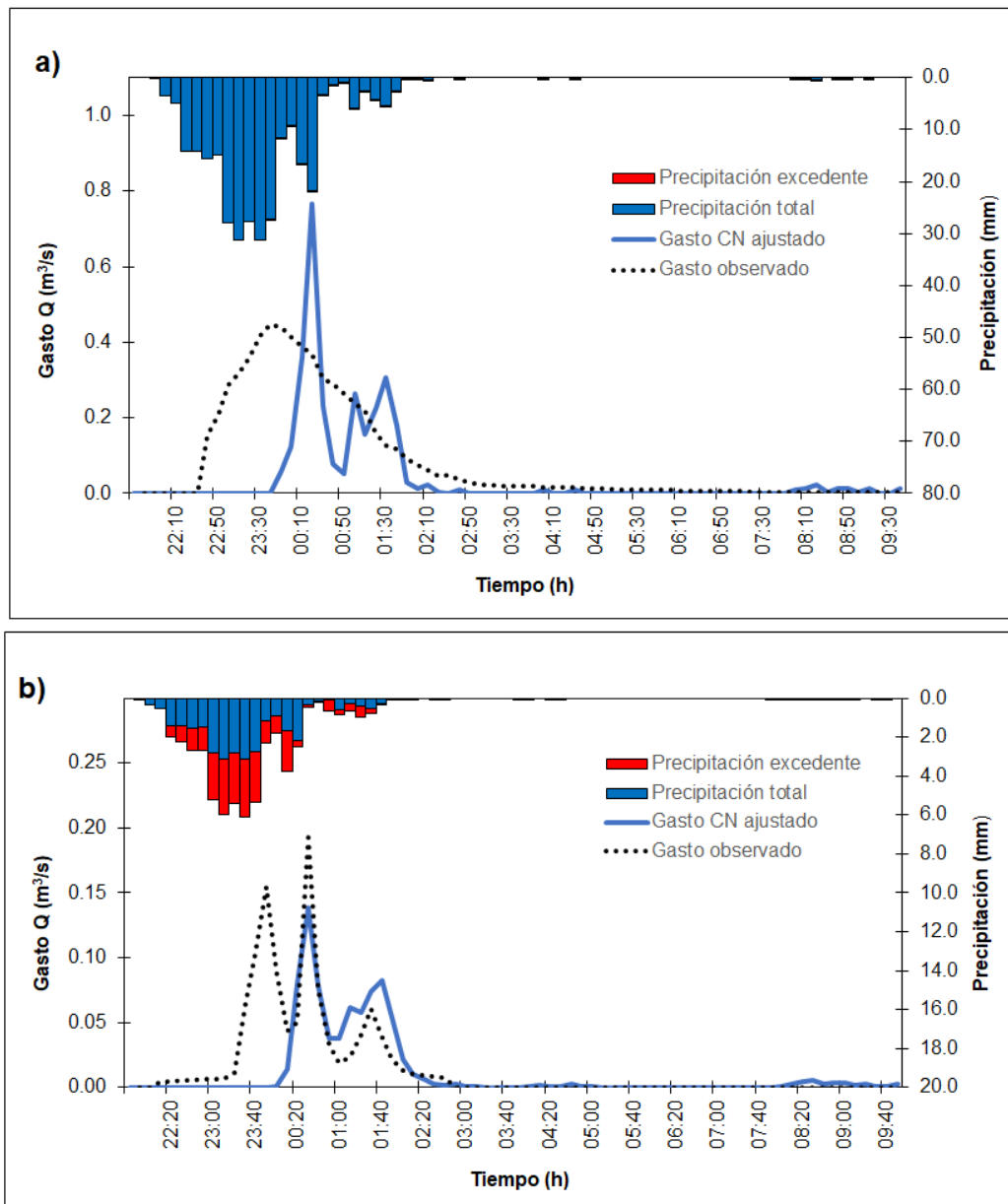


Figura 50. Caudal ajustado en el HEC-HMS y observado el 23 y 24 de abril del 2023, en los sistemas de:
a) Sistema silvopastoril y b) Área de forestación de bambú.

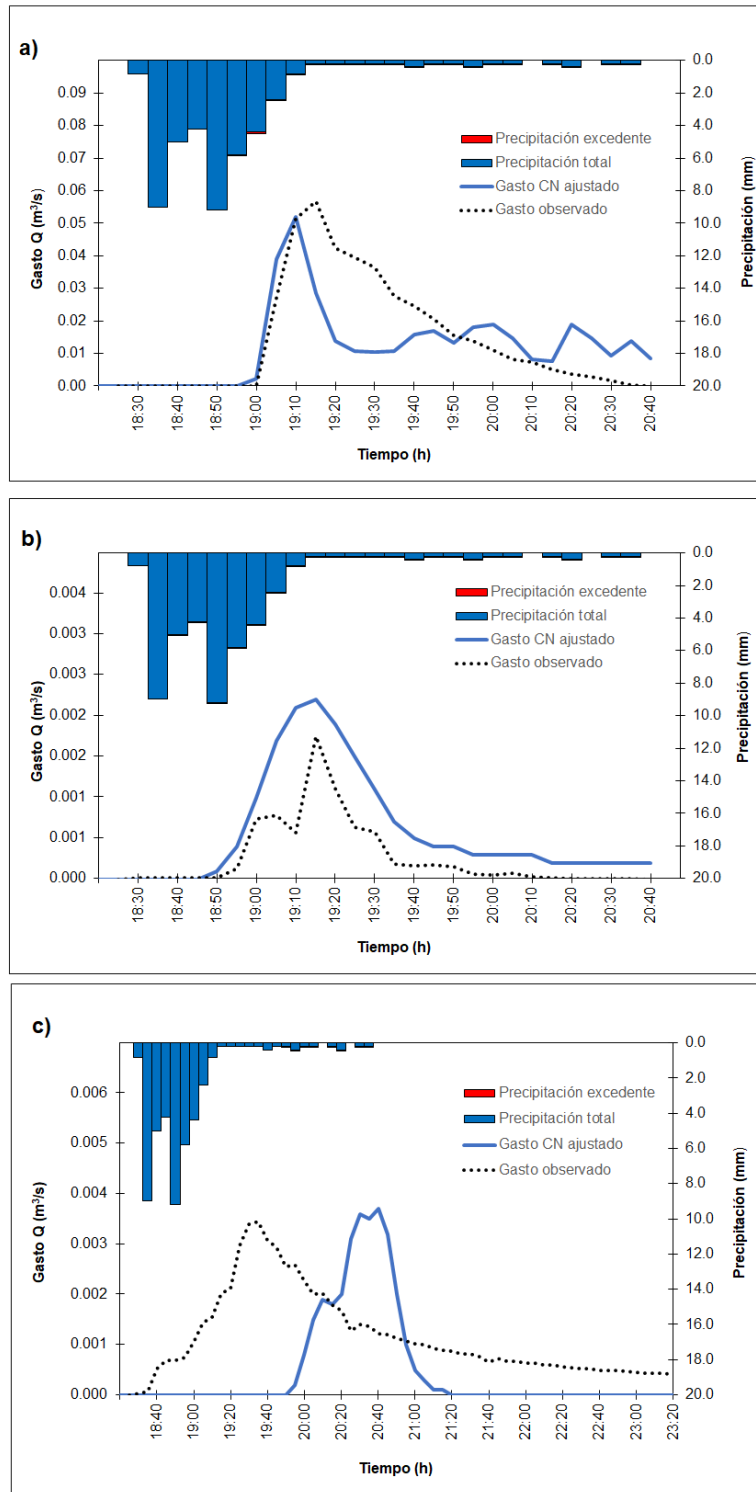


Figura 51. Caudal ajustado en el HEC-HMS y observado el 25 de agosto del 2023, en el sistema “Testigo de Selva alta Perennifolia”.

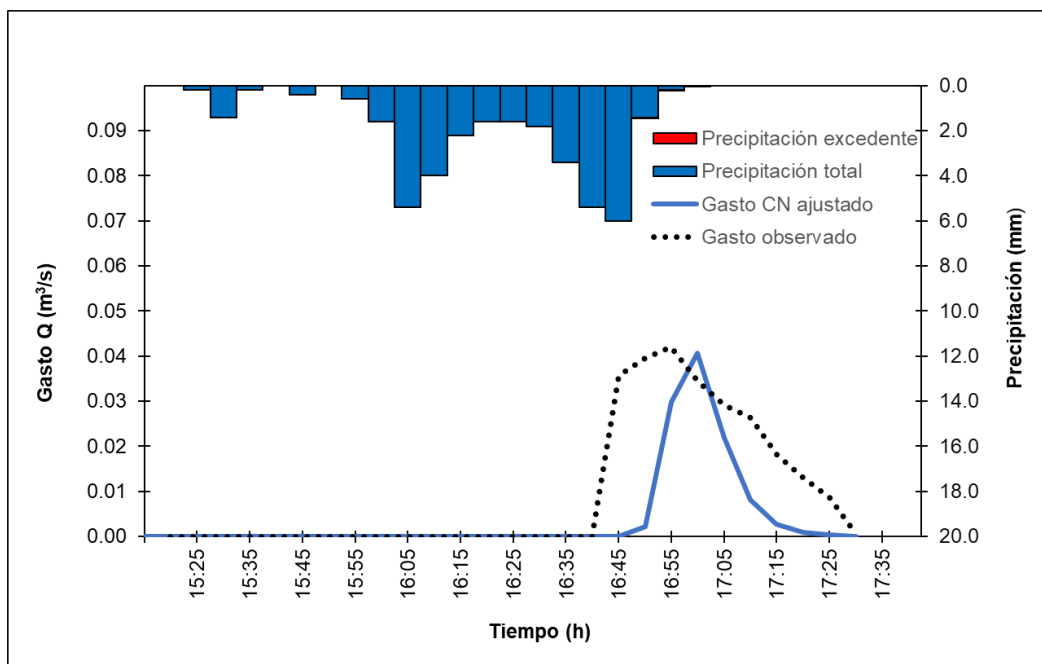


Figura 52. Caudal ajustado en el HEC-HMS y observado el 9 de septiembre del 2023, en el sistema Sistema silvopastoril.

Los resultados de la simulación con el modelo HEC-HMS (Cuadro 10), muestra que los valores de la lámina de escorrentía sin calibrar son muy elevados de los observados, no obstante, el comportamiento de los caudales pico por cada sistema productivo es similar, pues el sistema silvopastoril presenta la mayor lámina de escorrentía y menor en las áreas con cobertura arbórea. Una vez que los parámetros del número de curva y tiempo de retraso, para algunos casos, se calibraron, los valores de las láminas de escorrentía, y los volúmenes si se representa si se asemejaron. Notándose en el área de sistema silvopastoril la escorrentía observada fue de 14.7668 mm y ajustado fue de 7.0609 ajustando sólo el número de curva, con un índice de Nash-Sutcliffe fue de 0.019 y un RMSE de 0.9904 (cuadro 11), sin embargo, en el segundo evento de lluvia el índice de nash fue de 0.201 y un RMSE de 0.8940, la lámina de escorrentía observado fue de 0.4647 y el calibrado fue de 0.4033, con un caudal pico de 0.0568 observado y 0.0555 ajustado y la calidad de la modelación en función del índice Insuficiente de Nash se observan en el cuadro 12. En el sitio de reforestación el índice de Nash fue de 0.016 y el RMSE de 0.9921 siendo estos los valores que más ajustaron, pues el sitio de plantación de bambú y la selva tuvieron valores negativos del índice de Nash, no obstante, el pico

de escurrimiento se acerco a los observados asi como las láminas de escorrentía ajustadas. En la selva alta perennifolia el caudal observado no disminuyó paraleamente como en la calibración por lo que el índice de Nash fue insuficiente, difiriendo de resultados como los obtenidos por Guduru (2023) quien obtuvo una eficiencia de 0.83 ajustandose muy bueno en su calibración, al tratarse de la cuenca grande (2240 km) correspondiente al río Meki. No obstante, Price (2012) menciona que la dificultad de calibrar cuencas pequeñas, ante la insuficiente del índice de Nash obtenido en este estudio., que se podría generalizar para casi todos los eventos.

Cuadro 11. Volumen y láminas de escurrimiento de los sistemas de producción.

Uso de suelo y cobertura	Fecha	Lámina de escorrentía observada (mm)	Lámina de escorrentía simulada (mm)	Lámina de escorrentía ajustada (mm)	Q _p observado (m³/s)	Q _p calibrado (m³/s)
Sistema silvopastoril	23-24/04/2023	14.7668	257.4562	7.0609	0.4463	0.7908
Reforestación de bambú	23-24/04/2023	6.0564	251.3143	4.1810	0.1926	0.1319
Sistema silvopastoril	25/08/2023	0.4647	17.5552	0.4033	0.0568	0.0555
Plantación de Bambú	25/08/2023	0.0197	4.8271	0.0447	0.0018	0.0022
Selva alta perennifolia	25/08/2023	0.03	6.2638	0.0203	0.0035	0.0037
Sistema silvopastoril	09/09/2023	0.2921	0.0000	0.1250	0.0420	0.0422

*Q_p: Escurrimiento pico superficial

Cuadro 12. Tiempo de retraso y número de curva ajustado.

Uso de suelo y cobertura	Fecha	Tiempo de retraso (minutos)	Número de curva
Sistema silvopastoril	23-24/04/2023	SM*	19.369
Reforestación de bambú	23-24/04/2023	13	18.100
Sistema silvopastoril	25/08/2023	SM*	58.283
Plantación de Bambú	25/08/2023	11.794	1.000
Selva alta perennifolia	25/08/2023	12.000	54.100
Sistema silvopastoril	09/09/2023	7.1300	59.6900

*SM= Sin modificación

Cuadro 13. Calidad de la modelación en función del índice de Nash-Sutcliffe.

Uso de suelo y cobertura	Fecha	RMSE (mm)	Índice de Nash-Sutcliffe	Evaluación
Sistema silvopastoril	23-24/04/2023	0.9904	0.019	Insuficiente
Reforestación de bambú	23-24/04/2023	0.9921	0.016	Insuficiente
Sistema silvopastoril	25/08/2023	0.8940	0.201	Satisfactorio
Plantación de Bambú	25/08/2023	1.4138	-0.999	Insuficiente
Selva alta perennifolia	25/08/2023	1.6797	-1.822	Insuficiente
Sistema silvopastoril	09/09/2023	1.4531	-1.111	Insuficiente

4.5.3 Recarga potencial anual del acuífero

En el cuadro 13 se muestra la recarga potencial estimada, para los diferentes uso de suelo observándose que en las áreas arboladas como es la de reforestación de bambú, la plantación de bambu y el área testigo de Selva alta perennifolia, presentan los mayores valores de recarga con: 276.0391 mm (pp de 301.6 mm), 32.1553 (pp de 45.2 mm) y 30.6797 mm correspondientemente, el sistema silvopastoril tuvo una relativa menor recarga potencial con 276.0391 (pp de 301.6 mm) para el evento de lluvia más importante, 26.2967 (pp de 45.2 mm) y 20.3749 mm (pp de 39 mm). Es decir, en el evento de mayor precipitación la recarga potencial fue elevada para la reforestación de bambú con un 95% y un poco menor para el sistema silvopastoril con 91.5%. Para el evento de menor volumen de precipitación el área de plantación de bambú presentó mayor infiltración con un 71.1%, 67.9% para la selva y de 58.2% para el sistema silvopastoril. Para la pp de 39 mm la recarga fue de 52.2%.

Cuadro 14. Recarga potencial al acuífero estimado mediante la simulación optimizada con el modelo de HEC-HMS.

Uso de suelo y cobertura	Fecha	Precipitación (mm)	Escurrentía superficial (mm)	Infiltración (mm)	Retención de suelo (mm)	Recarga potencial (mm)	Recarga potencial (%)
Sistema silvopastoril	23-24/04/2023	301.6	7.0609	294.5391	18.5	276.0391	91.5
Reforestación de bambú	23-24/04/2023	301.6	4.181	297.419	11.0	286.419	95.0
Sistema silvopastoril	25/08/2023	45.2	0.4033	44.7967	18.5	26.2967	58.2
Plantación de Bambú	25/08/2023	45.2	0.0447	45.1553	13.0	32.1553	71.1

Uso de suelo y cobertura	Fecha	Precipitación (mm)	Escurrentía superficial (mm)	Infiltración (mm)	Retención de suelo (mm)	Recarga potencial (mm)	Recarga potencial (%)
Selva alta perennifolia	25/08 2023	45.2	0.0203	45.1797	14.5	30.6797	67.9
Sistema silvopastoril	09/09/2023	39.0	0.1251	38.8749	18.5	20.3749	52.2

4.5. CONCLUSIONES

El modelo HEC-HMS requirió ser calibrado, debido a que las simulaciones hechas con los valores iniciales del número de curva y tiempo de retardo no representaron los hidrogramas de escurrentía directa, incluso en la mayoría de los eventos de lluvia analizados y microcuencas estudiadas hubo una excesiva sobre representación. La calibración mejoró sustancialmente la representación del fenómeno de escurrentía, pues hubo cierto seguimiento de la evolución temporal de los caudales, y los volúmenes de escurrentía y caudales pico fueron muy parecidos a los observados en un 85.8% en promedio.

La recarga potencial de acuíferos estimada con el modelo HEC-HMS, permitió observar diferencias en la lámina de recarga para cada uso y cobertura de suelo, siendo la reforestación de bambú la de mayor aporte, seguido de la plantación de bambú y por último la selva alta perennifolia. En promedio los bosques recargan un 8.7% más que el sistema silvopastoril.

El uso del modelo HEC-HMS puede ser de utilidad para obtener aproximaciones en la predicción de la escurrentía en cuencas pequeñas, así como la infiltración y con ello inferir la recarga potencial de cuencas no aforadas. Lo cual podría apoyar en la gestión del recurso hídrico.

4.6 LITERATURA CITADA

- Alarcon-Zuniga, B., Ramirez-Gonzalez, J. J. M., Quijano-Hernandez, S., & Cervantes-Martinez, T. (2015). Yield components of three *Brachiaria* species harvested at two cutting frequencies in hueytamalco, puebla, mexico. In *Molecular Breeding of Forage and Turf: The Proceedings of the 8th International Symposium on the Molecular Breeding of Forage and Turf* (pp. 123-130). *Springer International Publishing*.
- Angulo, M. A., & Saavedra, O. C. (2018). modelación hidrológica de lacuenca maylanco utilizando hec-hms. *investigacion & desarrollo*, 18(1), 53–67.
- Bennett N G, Croke B F W, Guariso G, et al. 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling and Software*, 40: 1–20.
- Cacal, J. C., Austria, V. C. A., & Taboada, E. B. (2023). Extreme event-based rainfall-runoff simulation utilizing GIS techniques in Irawan watershed, Palawan, Philippines. *Civil Engineering Journal*, 9(1), 220-232.
- Castro, E. D. C., Hernández, J. I. V., Pérez, G. Á., & Valverde, G. R. (2021). Stand structure and tree diversity in three land management systems in Palmagtitan, Sierra Norte de Puebla. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3).
- Chow, V. T., Maidment, D., and Mays, L. W., (1988). *Applied Hydrology*. McGrawHill. International. Edition. (p.149).
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. (J. Saldarriaga, Trad.) Santafé de Bogota, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México*.
- CONAGUA. (2023). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero tecolutla (3002), estado de Veracruz*.
- Engineers, U. S. A. C. O. (2000). *Hydrologic modeling system HEC–HMS, technical reference manual*. California, USA.
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Friswell, M. I., Mottershead, J. E., Friswell, M. I., & Mottershead, J. E. (1995). *Finite element modelling* (pp. 7-35). Springer Netherlands.
- Huang, Y. P., Tsai, H. P., & Chiang, L. C. (2024). Integration of UAV Digital Surface Model and HEC-HMS Hydrological Model System in iRIC Hydrological Simulation—A Case Study of Wu River. *Drones*, 8(5), 178.
- Garcia Ramirez, P., Alatorre Cejudo, L. C., & Bravo Peña, L. C. (2023). Modelos de escorrentía superficial en la última década. Una revisión bibliográfica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 7726–7750.
- Guduru, J. U., Jilo, N. B., Rabba, Z. A., & Namara, W. G. (2023). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki River watershed, rift valley basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 197, 104743.

- Imran, M., Hou, J., Wang, T., Li, D., Gao, X., Noor, R. S., ... & Ameen, M. (2024). Assessment of the Impacts of Rainfall Characteristics and Land Use Pattern on Runoff Accumulation in the Hulu River Basin, China. *Water*, 16(2), 239.
- INEGI, 2014. Recuperado de: <http://mapserver.inegi.org.mx/mg>
- Janicka, E., Kanclerz, J., Agaj, T., & Gizińska, K. (2023). Comparison of Two Hydrological Models, the HEC-HMS and Nash Models, for Runoff Estimation in Michałówka River. *Sustainability*, 15(10), 7959.
- Janicka, E., & Kanclerz, J. (2022). Assessing the effects of urbanization on water flow and flood events using the HEC-HMS model in the Wiryńka River Catchment, Poland. *Water*, 15(1), 86.
- Jung, M. S., da Silva, J. A. G., Fachinetto, J. M., Carvalho, I. R., Lucchese, O. A., Basso, N. C. F., ... & da Silva, L. G. (2023). Water: A fundamental resource for ensuring sustainability. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(7), e03661-e03661.
- Leul, Y., Assen, M., Damene, S., & Legass, A. (2023). Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*, 147, 110024.
- Natural Resources Conservation Service -United States Department of Agriculture (NRCS-USDA). 2004.. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Hydrology National Engineering Handbook.
- Natural Resources Conservation Service -United States Department of Agriculture (NRCS-USDA). 2008.. Time of Concentration. Hydrology National Engineering Handbook.
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Watershed Modelling.
- Price, K., Purucker, S. T., Kraemer, S. R., & Babendreier, J. E. (2012). Tradeoffs among watershed model calibration targets for parameter estimation. *Water Resources Research*, 48(10).
- Sabale, R., Venkatesh, B., & Jose, M. (2023). Sustainable water resource management through conjunctive use of groundwater and surface water: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 17.
- Sahu, M. K., Shwetha, H. R., & Dwarakish, G. S. (2023). State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(3), 3029-3051.
- Saxton, K. E., (2006). Soil water characteristic. USDA Agricultural Research Service. Department of Biological Systems Engineering Washington State University. Versión 6.02.74.
- Shekar, P. R., & Mathew, A. (2023). Integrated assessment of groundwater potential zones and artificial recharge sites using GIS and Fuzzy-AHP: a case study in Peddavagu watershed, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 906.

- Singh, H., Alam, M. A., Sharma, P. J., & Rautela, K. S. (2023). A comparison of the SCS-CN-based models for hydrological simulation of the Aghanashini River, Karnataka, India. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(4), 507-519.
- Natural Resources Conservation Service -United States Department of Agriculture (NRCS-USDA). 2004.. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Hydrology National Engineering Handbook.
- Vilchis-Mata, I., Bâ, K. M., Franco-Plata, R., & Díaz-Delgado, C. (2015). Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 45-60.
- Zekrifa, D. M. S., Kulkarni, M., Bhagyalakshmi, A., Devireddy, N., Gupta, S., & Boopathi, S. (2023). Integrating Machine Learning and AI for Improved Hydrological Modeling and Water Resource Management. In *Artificial Intelligence Applications in Water Treatment and Water Resource Management* (pp. 46-70). IGI Global.