



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA
ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE
LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018.**

Ximena Vargas López

Asesorado por Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018.

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

XIMENA VARGAS LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
EXAMINADOR	Inga. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de julio de 2019.

Ximena Vargas López

Guatemala 7 de julio de 2021

Ing Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
U.S.A.C.
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Por este medio, hago constar que yo, el Ingeniero Walter Arnoldo Bardales Espinoza, con numero de colegiado cuatro mil doscientos setenta y nueve (4279), doy como visto bueno el desarrollo del trabajo de investigación final de graduación de la alumna Ximena Vargas López, identificación CUI 2992 19275 0101, alumna a quien he podido apoyar como asesor de su protocolo de tesis.

Dando por concluido el desarrollo de la misma investigación y planteando las soluciones inmediatas y efectivas para el beneficio de la institución donde se desarrollo la misma.

Doy por concluido de forma eficiente ante mi persona el desarrollo de su trabajo de investigación como tema: "ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018."

Línea de investigación: cambio de uso de suelo, ciclo hidrológico

Área: ingeniería ambiental

Aprovecho la oportunidad para expresar mi consideración

Atentamente,



M.Sc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Maestro en Recursos Hidráulicos Opción Hidrología
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 4279

M. Sc. Ingeniero Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Ingeniero Agrónomo, Master en Hidrología.
Colegiado activo no. 4279



Guatemala, 09 de junio de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.020.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **017-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Ximena Vargas López**.
Identificado con número de carné: **2992192750101**.
Identificado con registro académico: **201513720**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Walter Arnoldo Bardales Espinoza, profesional de la Ingeniería Agronómica

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Carlos Salvador Wong Davi
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
COLEGIADO. NO. 561



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Sistemas de Enseñanza Superior





Guatemala, 15 de octubre de 2021
Ref. EIQ.212.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018** del(la) estudiante Ximena Vargas López, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Ambiental.

“Id y Enseñad a Todos”




Ing. Williams G. Alvarez Mejia, M.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

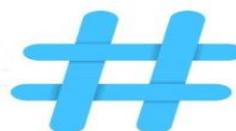
Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 524-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL CICLO DE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CAHABÓN, HASTA EL PUNTO DE CONTROL DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CHAJCAR, DURANTE EL PERÍODO DE 1999 A 2018**, presentado por la estudiante universitaria: **Ximena Vargas López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi papá y mamá

Sergio Vargas y Lucrecia López, por ser mi ejemplo de vida, por su apoyo incondicional y sus constantes enseñanzas.

Mi hermana y hermano

Natalia y Carlos Vargas, por su apoyo y cariño.

Mis abuelas

Alicia Daetz y Eugenia Guzmán, por ser mi inspiración.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios y permitirme desarrollar mis capacidades.

Mi familia

Por ser mi motor y mayor inspiración.

Mi asesor y amigo

Ingeniero Walter Bardales, por compartir su conocimiento y guiarme durante el proceso del trabajo de tesis.

Mis amigas

Ruby Iriarte y María José López, por acompañarme durante toda mi carrera, por su constante apoyo y amistad incondicional.

Mi amigo y novio

Diego Jurado, por alentarme a crecer como mujer y profesional.

**Mis amigas y amigos de
la facultad de ingeniería**

En especial a mis futuros colegas Paula Zuleta, Lizbette Hernández y Víctor Gómez por empujarme a buscar la excelencia día a día.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Determinación del problema.....	4
1.3.1. Definición	4
1.3.2. Delimitación	5
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Lluvia	8
2.2. Evaporación.....	8
2.3. Evapotranspiración	8
2.4. Escorrentía	10
2.4.1. Hidrograma unitario	11
2.4.2. Curva de duración de caudales	12
2.5. Flujo subsuperficial	13
2.6. Infiltración	14
2.7. Agua subterránea	14
2.8. Cuenca	15

2.8.1.	Parte aguas	15
2.8.2.	Área de captación	15
2.8.3.	Red de ríos.....	15
2.8.4.	Relación de bifurcación	17
2.8.5.	Densidad de drenaje	17
2.9.	Caracterización morfométrica de la cuenca	18
2.9.1.	Pendiente media	19
2.9.2.	Coeficiente de compacidad (K_c)	19
2.9.3.	Factor de forma (K_f).....	20
2.10.	Balance de recarga hídrica	21
2.10.1.	Cálculo de la precipitación efectiva	22
2.10.2.	Cálculo de la esorrentía.....	24
2.10.3.	Cálculo de la evapotranspiración potencial	24
2.10.4.	Geología.....	25
2.10.5.	Taxonomía del suelo	27
2.11.	Suelo.....	28
2.11.1.	Uso de la tierra	28
2.11.2.	Capacidad de uso de la Tierra	29
2.11.3.	Intensidad de uso de suelo.....	29
2.11.4.	Cambio de uso de suelo.....	30
2.12.	Caracterización socioeconómica de la cuenca del río Cahabón.....	31
2.12.1.	Demografía.....	31
2.12.2.	Educación.....	33
2.12.3.	Población económicamente activa	34
2.13.	Modelos de lluvia esorrentía.....	36
2.14.	Variables a utilizar en el Software HEC-HMS 4.4	36
2.14.1.	Determinación del uso de suelo según datos del MAGA.....	36

2.14.2.	Determinación del uso de suelo a partir de imágenes satelitales	39
2.14.3.	Lluvia	47
2.14.4.	Curva número	50
2.14.5.	Tiempo de concentración y tiempo de retardo	53
2.14.6.	Capacidad de Almacenamiento	54
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	57
3.1.	Variables.....	57
3.2.	Delimitación del campo de estudio	58
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	59
3.4.	Recursos materiales disponibles	59
3.5.	Técnica cuantitativa	60
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	61
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información....	63
3.8.	Análisis estadístico	67
3.9.	Plan de análisis de los resultados	67
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables	67
3.9.2.	Programas a utilizar para análisis de datos	68
3.10.	Modelo de la cuenca para HEC-HMS.....	68
3.10.1.	Canopy: Simple Canopy	69
3.10.2.	Superficies: superficie simple	69
3.10.3.	Perdida: curva número SCS	70
3.10.4.	Método de transformación: <i>Clark Unit Hydrograph</i> ..	73
3.10.5.	Enrutamiento: tiempo de retardo (<i>Lag</i>)	73
3.10.6.	Base Flow: Constante mensual	74
3.11.	Modelo meteorológico para HEC-HMS	75
3.11.1.	Precipitación	76

3.11.2.	Evapotranspiración Potencial	76
3.12.	Calibración del modelo.....	77
3.13.	Generación de la curva de duración de caudales	79
3.14.	Cálculo del balance hídrico: recarga potencial hídrica del acuífero	80
4.	RESULTADOS.....	87
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	95
	CONCLUSIONES.....	99
	RECOMENDACIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	103
	APÉNDICES.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama esquemático del ciclo hidrológico	7
2.	Partes del hidrograma unitario	12
3.	Ejemplo de curva de duración de caudales.....	13
4.	Red de ríos de la cuenca del río de Cahabón	16
5.	Características de la forma de la cuenca del río Cahabón.....	18
6.	Geología en la cuenca del río Cahabón	26
7.	Características del suelo de la cuenca del río Cahabón	27
8.	Población por género	32
9.	Población por grupos etarios.....	32
10.	Alfabetización en la cuenca del río Cahabón	33
11.	Nivel de escolaridad en la cuenca del río Cahabón	34
12.	Población activa e inactiva económicamente.....	35
13.	Población activa e inactiva económicamente por género	35
14.	Reclasificación del uso de suelo 1999 en la cuenca del río Cahabón....	37
15.	Reclasificación del uso de suelo 2005 en la cuenca del río Cahabón....	38
16.	Reclasificación del uso de suelo 2010 en la cuenca del río Cahabón....	39
17.	Herramienta de Preprocesamiento de Semi-Automatic Classification Pluggin.	43
18.	Generación del Banda set 1	44
19.	Resultado de la Combinación de bandas.....	45
20.	Reclasificación del uso de suelo 2,015 en la cuenca del río Cahabón...	46
21.	Reclasificación del uso de suelo 2,018 en la cuenca del río Cahabón...	47

22.	Estaciones meteorológicas y subcuencas de la cuenca del río Cahabón	48
23.	Subcuencas de la Cuenca del río Cahabón.....	52
24.	Ubicación de la cuenca del río Cahabón	58
25.	Serie de tiempo de precipitación anual en la cuenca del río Cahabón	63
26.	Serie de tiempo de precipitación mensual de la cuenca del río Cahabón	65
27.	Modelo de la cuenca.....	75
28.	Curva de duración de caudales para los años 1999, 2005, 2010, 2015 y 2018	80
29.	Infiltración Base promedio del suelo la cuenca del río Cahabón	81
30.	Densidad aparente del suelo de la cuenca del río chabón	82
31.	Capacidad de campo del suelo de la cuenca del río chabón.....	83
32.	Punto de Marchitez permanente del suelo de la cuenca del río chabón	84
33.	Clasificación del porcentaje de pendiente.....	85
34.	Variación del uso de suelo de la cuenca.....	87
35.	Comportamiento del valor de la curva número ponderada para la cuenca del río Cahabón	88
36.	Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 1999	89
37.	Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2005.....	89
38.	Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2010.....	90
39.	Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2015.....	90

40.	Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2018	91
41.	Caudal promedio anual	92
42.	Variación del caudal de estiaje.....	92
43.	Comparación del cambio de curva numero y el caudal de estiaje para la cuenca del río Cahabón.	93
44.	Balance hídrico, recarga potencial del acuífero	93
45.	Comparación del cambio de curva número y la Recarga potencial del acuífero de la cuenca del río Cahabón	94

TABLAS

I.	Radiación extraterrestre según latitud de Guatemala	10
II.	Relación de bifurcación	17
III.	Forma de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad	19
IV.	Clasificación de forma de la cuenca en función del factor de forma (K_f).....	20
V.	Valor de retención vegetal.....	22
VI.	Valores de infiltración básica por efecto de la pendiente (K_p).....	23
VII.	Valores de infiltración base según la cobertura vegetal (K_v).....	23
VIII.	Características del suelo de la cuenca del río Cahabón	28
IX.	Capacidad de uso de la tierra según el INAB.....	30
X.	Bandas Espectrales de Landsat 8.....	40
XI.	Combinación de bandas espectrales	41
XII.	Área de influencia de las estaciones meteorológicas.....	49
XIII.	Curva número en función de grupo hidrológico y uso del suelo, para condiciones normales (CN II)	50
XIV.	Valores para determinar el tiempo de concentración según metodología SCS	54

XV.	Capacidad de almacenamiento para suelo en condiciones normales	55
XVI.	Morfometría de la cuenca.	61
XVII.	Curva Número Pondera de la cuenca del río Cahabón	62
XVIII.	Precipitación mensual del período de estudio en la cuenca	62
XIX.	Parámetros estadísticos de la precipitación anual	64
XX.	Parámetros estadísticos de la precipitación mensual por estación.....	65
XXI.	Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe para los modelos lluvia- escorrentía.....	66
XXII.	Curva Número ponderada de las subcuencas de la cuenca del río Cahabón, en condiciones normales.....	71
XXIII.	Porcentaje de área impermeabilizada por subcuenca	71
XXIV.	Abstracción inicial de las subcuencas del río Cahabón	72
XXV.	Tiempo de Concentración en horas	73
XXVI.	Tiempo de retardo en minutos	74
XXVII.	Caudal base mensual histórico	74
XXVIII.	Radiación extraterrestre equivalente a lámina de agua (mm/día) para el hemisferio norte, aplicable a la cuenca de Cahabón	76
XXIX.	Valores referenciales del criterio Nash-Sutcliffe	78
XXX.	Parámetros calibrados	79
XXXI.	Balance hídrico de la recarga hídrica del acuífero	85
XXXII.	Resultados de la simulación de caudales pico	91

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de la cuenca
N	Canales
Kc	Coeficiente de compacidad
Dd	Densidad de drenaje
H	Desnivel de la longitud del cauce principal
Kf	Factor de forma
Ha	Hectárea
Km	Kilómetros
Km²	Kilómetros cuadrados
L	Longitud del cauce principal de la cuenca
>	Mayor que
<	Menor que
M	Metros
µm	Micrometros
mm	Milímetros
Mm³	Millones de metros cúbicos
P	Perímetro de la cuenca
%	Porcentaje
R_B	Relación de bifurcación
L_s	Sumatoria de la longitud de los cauces
T_c	Tiempo de concentración
T_r	Tiempo de retardo

GLOSARIO

CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, por sus siglas en inglés.
Cuenca del río Cahabón	Se entiende como el territorio que comprende la delimitación de la cuenca hasta el punto de control de la estación hidrométrica Chajcar.
DEM	Modelo de elevación digital.
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i> , por sus siglas en inglés.
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System, por sus siglas en inglés.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
MAGA	Ministerio de agricultura, ganadería y alimentación.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

TOA

Top of Atmosphere reflectance, por sus siglas en inglés.

USGS

United States Geological Survey, por sus siglas en inglés.

RESUMEN

El cambio de uso del suelo posee un impacto negativo en la degradación de las características físicas y químicas del suelo, así mismo, estos procesos incrementan la vulnerabilidad de regiones de captación de agua, regulación de la infiltración y erosión. De la misma manera, las alteraciones al suelo impactan y modifican los ciclos naturales convirtiéndose en ciclos antrópicos o alterados.

Para promover una gestión integrada responsable y racional de una cuenca se presenta este trabajo de investigación, donde se estimó el impacto del cambio de uso de la tierra en el ciclo hidrológico de la cuenca del río Cahabón, ubicada en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala. Para efectos de la investigación, se utilizará como punto de control la ubicación de la estación hidrométrica Chajcar, la cual se ubica en las coordenadas X:533673.649 y Y:1712397.966, proyección GTM y datum WGS84.

Para el análisis de la cuenca, perteneciente a la vertiente del caribe, se realizó una comparación de los balances hídricos de la recarga potencial del acuífero y los usos del suelo dentro del período de años de 1999 hasta 2018.

OBJETIVOS

General

Determinar el impacto del cambio de uso de la Tierra en el comportamiento del caudal de la cuenca del río Cahabón.

Específicos

1. Identificar el uso de la Tierra en la cuenca del río Cahabón mediante las coberturas de vegetación.
2. Estimar el comportamiento del hidrograma mediante un modelo de lluvia escorrentía en la cuenca.
3. Evaluar los cambios en la disponibilidad hídrica respecto al cambio de uso de la Tierra a través del balance hídrico.

INTRODUCCIÓN

El suelo es el medio para el desarrollo de diversos recursos naturales que son utilizados como materia prima para satisfacer las necesidades del ser humano. Por ende, el acelerado crecimiento de la población genera un aumento en la demanda de dichos recursos, que por lo general conlleva sobreexplotación del suelo y su capacidad.

Los factores socioeconómicos, como las prácticas agrícolas, infraestructura y actividades industriales que se llevan a cabo en una región, tiene la capacidad de definir el uso del suelo y sus cambios. Comúnmente, las modificaciones que un suelo sufre provocan un impacto negativo en los servicios ambientales que el suelo puede aportar, como la capacidad de ser reservorio del carbono, la garantía de conservación de la diversidad biológica, fertilidad y recarga hídrica a través de la infiltración. Como consecuencia de la gestión irresponsable y el consumo irracional del recurso edáfico se ocasiona inestabilidad en los sistemas naturales, que afectan la calidad y cantidad disponible del recurso hídrico.

En Guatemala no es una práctica común definir la magnitud del impacto de estas alteraciones al suelo, sin embargo, es de suma importancia cuantificar estos efectos para promover planes de gestión integral de cuencas con medidas de mejoramiento, conservación y mitigación adecuada.

El presente trabajo de graduación buscó estimar el impacto del cambio de uso de suelo en el comportamiento del ciclo hidrológico en la cuenca del río Cahabón comparando el comportamiento del balance hídrico y la intensidad del uso del suelo de la cuenca.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

El Instituto Geográfico Nacional¹ en el 2008 publicó que, Guatemala posee una extensión territorial de aproximadamente 108 889 km², colindando al norte y oeste con México, al este con Honduras y El Salvador, al sur con el océano Pacífico.

El recurso hídrico de Guatemala se distribuye en tres vertientes hidrográficas que son la vertiente del Pacífico, vertiente del mar Caribe y la del Golfo de México. La cuenca del río Cahabón se encuentra dentro de la vertiente del Caribe, cuya cobertura territorial es de 33 755,59 km². La demanda hídrica en la Vertiente del Caribe es de 185,4010 mm³ al año, lo que equivale a una demanda per cápita de 0,5779 Mm³/poblador/día².

Para estimar el efecto sobre cualquier componente del ciclo hidrológico, se debe tomar en cuenta que la variabilidad es un fenómeno que se observa sobre registros longevos³. Dicha variabilidad puede depender de factores naturales o antropogénicos, por lo que contar con una red de estaciones meteorológicas con registros longevos es indispensable para el análisis de dicho factor. Se recomienda que, para estimar el impacto en el escurrimiento superficial, se debe

¹Instituto Geográfico Nacional. *Atlas Hidrológico*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_hidro.htm. Consulta: 26 de agosto de 2019.

² Global Water Partnership. *La situación de los recursos hídricos en centroamérica: hacia una gestión integrada*. <https://www.iagua.es/noticias/publicaciones/14/01/30/recursos-hidricos-en-centroamerica-hacia-una-gestion-integrada-44423>. Consulta: 15 de septiembre de 2019.

³ FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la Subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. p. 3.

modelar el proceso de lluvia esorrentía para evaluar el comportamiento del caudal, dentro del período a analizar.

Para el análisis de condiciones hidrológicas existen diversos Softaweres que facilitan estos procesos. Este es el caso del programa Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Este programa fue diseñado para simular los procesos hidrológicos del sistema de una microcuenca, subcuenca o cuenca. El software incluye análisis hidrológico tradicional, así como procesos necesarios para una simulación continua que incluye procesos de evapotranspiración, deshielo y valores de humedad del suelo.

1.2. Justificación

Una cuenca hidrográfica posee características biofísicas, morfológicas y socioeconómicas que permiten analizar los efectos y magnitud de eventos meteorológicos extremos o modificaciones de origen antropogénico.

En el 2017 se mencionó que, los recursos naturales presentes en una cuenca se ven vulnerables ante la demografía, la pobreza, desigualdad, el crecimiento económico y comercial⁴. Ante estos factores se da el cambio de uso del suelo que posee un impacto negativo en la degradación del suelo provocando emisión de gases de efecto invernadero, en especial Dióxido de Carbono Cuando se dan estos cambios en una cuenca, no solo se modifica el espacio físico sino también los ciclos naturales convirtiéndose en ciclos antrópicos o alterados. El ciclo hidrológico no es una excepción, debido a que el manejo inadecuado del

⁴ HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, Alberto; VERA MACÍAS, Leonardo; NAVEDA BASURTO, Carlos; GUZMÁN CEDEÑO, Ángel; VIVAR ARRIETA, Marco; ZAMBRANO, Teódulo; MESÍAS GALLO, Freddy; ORMANZA, Katty; LEÓN AGUILAR, Rolando; ALAVA LÓPEZ, Geoconda. *Variaciones en algunas propiedades del suelo por el cambio de uso de la tierra, en las partes media y baja de la microcuenca Membrillo, Manabí, Ecuador*. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v38n1/ctr06117.pdf>. Consulta: 8 de octubre de 2019.

suelo tiende a incrementar la vulnerabilidad de regiones de captación de agua, regulación de la infiltración y erosión.

La relación entre la población y el cambio de uso de suelo radica en el tipo de actividades económicas que realizan. Según datos de INE en el 2016, el 65,8 % de la población guatemalteca se dedica a la agricultura, silvicultura y pesca. Por ende, el principal aporte de materia prima proviene de los ecosistemas, teniendo impactos como la deforestación y el sobreuso del suelo.

El cambio de uso de suelo en bosques queda evidenciado en la pérdida de cobertura boscosa, la cual durante el período de 2006-2010 fue de 132 137 hectáreas anuales⁵. Entre las principales causas de la pérdida de cobertura boscosa esta la distribución de la matriz energética de Guatemala, que se beneficia del aporte energético de quema de biomasa como lo leña. Otra causa es el crecimiento poblacional, cuya presión sobre los bosques implica demanda de tierra para actividades agropecuarias de subsistencia. Se debe mencionar que no solo la agricultura de subsistencia posee impacto en el cambio de uso de suelo, por ejemplo, el crecimiento en los últimos años de monocultivos como lo es la Palma africana y el huelle también generan presión sobre el recurso forestal. Cabe mencionar los incendios de origen antrópico, que según el centro de monitoreo y evaluación CEMEC CONAP, se vinculan al uso inapropiado del fuego, deficiencia de mecanismos de control y deforestación industrial.

⁵ Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Informe Ambiental del Estado de Guatemala 2016*. p. 34.

Por otra parte, la demanda sobre el recurso lítico y edáfico también es un factor para el cambio de uso de suelo. A partir de datos del MARN⁶, se determinó que el 47,81 % del territorio nacional está siendo usado de manera correcta y el 16,15 % es subutilizado. No obstante, el 33,27 % del territorio nacional se encuentra en sobre uso. Por lo general el sobreuso de suelo en Guatemala se da en regiones montañosas donde existen cultivos anuales que erosionan la tierra, también en estas regiones existen casos de pastos cultivados, cultivos permanentes cuya intensidad de uso sobre pasa la capacidad del suelo. Es importante que Alta Verapaz esta categorizado entre los primeros diez departamentos donde se da más sobre uso de suelo.

Con el presente estudio se pretende generar información de la relación del cambio de uso de suelo y las alteraciones al ciclo hidrológico, específicamente el caudal del río, para generar capacidad de promover gestiones integradas de las cuencas; buscando el aprovechamiento racional y responsable de los recursos naturales, respetando la capacidad y el uso de suelo adecuado que nos ofrece la región analizada.

1.3. Determinación del problema

A continuación, se da una breve descripción de la problemática que busca atender la presente tesis. Además, se delimita la región de interés para la tesis.

1.3.1. Definición

El cambio de uso de suelo es el término que se le da a las modificaciones antropogénicas en la superficie terrestre. A través del tiempo el ser humano ha

⁶ Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Informe Ambiental del Estado de Guatemala 2016*. p. 35.

modificado el uso del suelo para obtener materia prima indispensable para su desarrollo. El cambio de uso de suelo provoca cambios en los ecosistemas incluyendo pérdida de biodiversidad y contaminación de los recursos naturales.

El caso de la cuenca del río Cahabón no es excepción a estas condiciones de cambio. En el año 1999 el 52,32 % de la cuenca se encontraba ocupada por Bosque Natural, pero en el año 2010 solo el 33,63 % era cobertura boscosa⁷. La deforestación que se presenta en la cuenca se exagera por causas como la expansión de la frontera Agrícola, el uso de leña como fuente de energía y la urbanización.

El ciclo hidrológico y sus componentes se ven alterados por el cambio de uso de suelo en la región de la cuenca. Algunos de estos factores son la alteración en la infiltración por pérdida de la cobertura boscosa y permeabilización de terrenos urbanizados. El cambio de la cobertura por pérdida de vegetación y aumento en las construcciones también tiene un impacto tangible en el albedo, causando variaciones en la evapotranspiración.

1.3.2. Delimitación

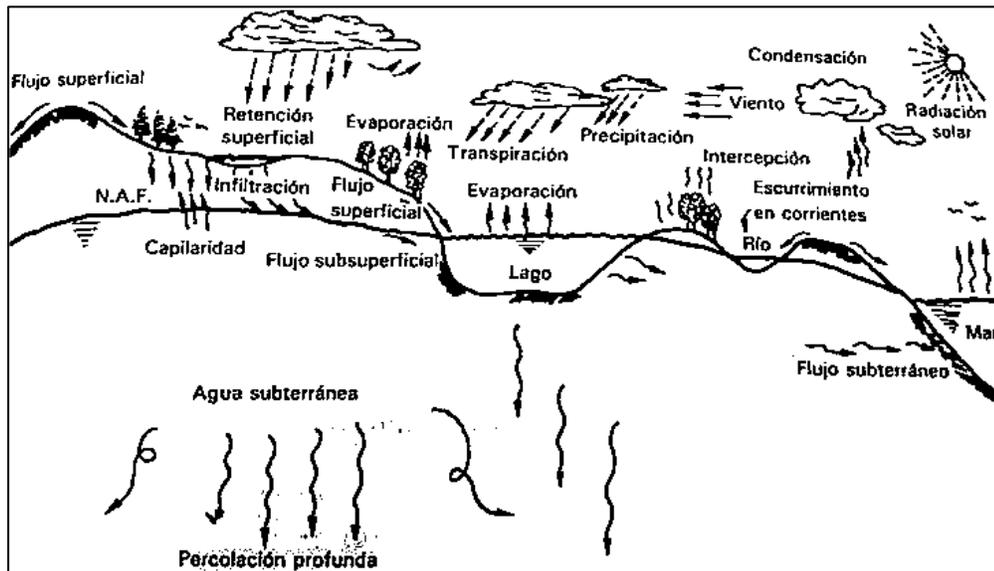
La cuenca del río Cahabón pertenece a la vertiente del caribe y se encuentra en el departamento de Alta Verapaz. El punto de control que se utilizara está ubicado en la estación hidrométrica Chajcar, con coordenadas Y: 533 673,649 y X: 1 712 397,966. A partir de este punto la cuenca posee una extensión territorial de 778,92 km² y un perímetro de 202,51 km. El cauce principal tiene una longitud de 70,40 km.

⁷ Instituto Nacional de Bosques; Consejo Nacional de Áreas Protegidas; Universidad del Valle de Guatemala; Universidad Rafael Landívar. p. 11.

2. MARCO TEÓRICO

El ciclo hidrológico es el proceso que detalla la circulación del agua en la atmósfera, suelo y subsuelo en los distintos estados de la materia⁸. Este se denomina como un ciclo cerrado sin principio o fin definido; los diferentes componentes del ciclo hidrológico se dan de forma continua y muchas veces simultáneas por la influencia del calor del sol y la fuerza de gravedad.

Figura 1. Diagrama esquemático del ciclo hidrológico



Fuente: APARICIO MIJARES, Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 17.

⁸ TRONCOSO GALLARDO, David Eduardo. *Simulación hidrológica del efecto del cambio de uso del suelo sobre el caudal en la cuenca del río Cruces*. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfci853s/doc/bmfci853s.pdf>. Consulta: 2 de julio de 2019.

2.1. Lluvia

La formación de gotas de lluvia proviene de la condensación de grandes masas de vapor en condiciones favorables, como lo es la disminución de temperatura y la disminución de presión. La lluvia o precipitación se refiere al agua que cae de la atmósfera hacia la superficie terrestre. Este componente del ciclo hidrológico una vez toca el suelo escurre hacia las corrientes.

La lluvia se puede representar en mapas de isoyetas, los cuales se construyen interpolando registros de lluvia tomados con pluviógrafos⁹. Otra manera de representar la lluvia es por medio de un hietograma de lluvia, que es una gráfica de intensidad versus tiempo.

2.2. Evaporación

La evaporación es la transferencia de agua de su estado líquido al estado gaseoso y es transferida a la atmósfera. El proceso de evaporación está relacionado a la presión de vapor del líquido y la presión de vapor del área donde se sitúa dicho líquido. Es decir, entre menor sea la diferencia entre estos dos factores mayor posibilidad de evaporación. La presión de vapor no es el único factor determinante de este proceso¹⁰; La temperatura es una condición que puede determinar la velocidad de evaporación.

2.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el proceso combinado de evaporación y transpiración. La transpiración se define como el mecanismo mediante el cual las

⁹ CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. p. 34.

¹⁰ *Ibíd.* p. 35.

plantas y animales absorben humedad y la transpiran al aire en forma de vapor. En el caso de las plantas, la transpiración varía dependiendo de su ciclo de crecimiento y la disponibilidad de agua. Una de las ecuaciones para calcular la evapotranspiración por método empírico es Hargreaves-Samani, cuya ecuación plantea que¹¹:

$$ETP = Kt \times Re \times (T_{med} + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0,5}$$

(Ec. 1.)

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/día)

Tmed: temperatura media diaria = $\frac{T_{max} + T_{min}}{2}$

Re: Radiación extraterrestre equivalente a lámina de agua (mm/día)

Kt: 0,0021

El valor de la radiación extraterrestre se determina a través de una interpolación lineal de la tabla 1. Los valores utilizados en la presente tesis se presentan en el anexo 2 de la presente tesis.

¹¹ CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. p. 37.

Tabla I. Radiación extraterrestre según latitud de Guatemala

Northern Hemisphere												Lat.	Southern Hemisphere											
Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.6	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.3	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.3	15.7	15.6	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Fuente: VON ZABELTITZ, Wilfried O. Baudoin FAO. *Greenhouses and Shelter Structures for Tropical Regions*. p. 22.

2.4. Escorrentía

Existen varios tipos de escorrentía o flujos de escurrimiento, esto de acuerdo con lo que describen Aparicio¹² en 1992. El primer tipo de escurrimiento es el escurrimiento superficial o escurrimiento directo, que se compone del flujo de superficie de terreno y el escurrimiento en corrientes. El escurrimiento de superficie de terreno o *overland flow* hace referencia al flujo que no llega a un cauce definido y en su trayecto se evapora, se infiltra y posterior llega a un cauce definido convirtiéndose en el segundo componente del escurrimiento superficial: el escurrimiento en corrientes.

¹² APARICIO MIJARES, Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 21.

El escurrimiento base se conforma por los otros dos tipos de escurrimiento que se alimentan de la precipitación infiltrada. Estos tipos de escurrimiento se conocen como escurrimiento subsuperficial o escurrimiento subterráneo, dependiendo del nivel freático que logra alcanzar la lluvia infiltrada.

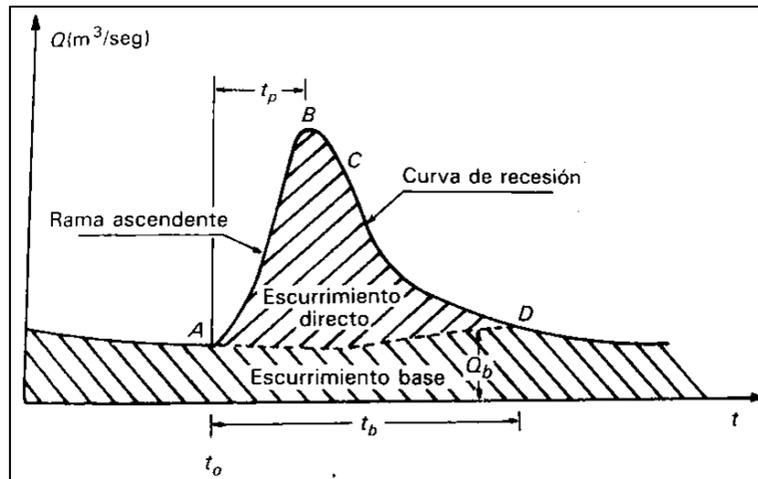
2.4.1. Hidrograma unitario

El escurrimiento puede graficarse por medio de un Hidrograma unitario que relaciona el volumen de escurrimiento contra el tiempo.

Un hidrograma unitario, por lo general, se pueden distinguir:

- A: punto de levantamiento. Es el punto donde la lluvia de la tormenta analizada llega a la salida de la cuenca.
- B: pico. Es el mayor volumen de escurrimiento por unidad de tiempo alcanzado durante la tormenta analizada.
- C: punto de inflexión. Es el punto donde inicia el escurrimiento subsuperficial.
- D: final del escurrimiento directo. A partir del tiempo dado en el punto D la tormenta deja de influir en el escurrimiento y vuelve a ser el escurrimiento base, el presente en las dinámicas de una cuenca.
- T_p : Es el tiempo transcurrido desde que la lluvia de la tormenta llega a la salida de la cuenca hasta que alcanza el mayor volumen de escurrimiento.
- T_b : Es el tiempo transcurrido donde el escurrimiento directo influye en la dinámica de una cuenca.

Figura 2. Partes del hidrograma unitario



Fuente: APARICIO MIJARES, Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 29.

2.4.2. Curva de duración de caudales

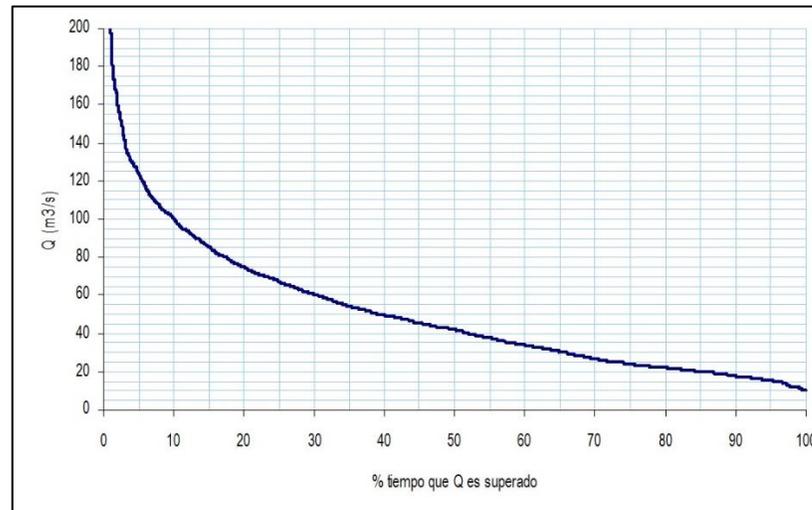
Esta curva representativa de los caudales indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos¹³. Además, la curva indica el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia. La curva se puede construir a partir de caudales diarios, mensuales, anuales, entre otros.

Esta gráfica tiene el caudal como ordenada y el porcentaje de días del año en la abscisa. Con esta grafica podemos distinguir caudal máximo (rebasado 10 días al año), caudal de sequía (rebasado 355 días al año), caudal de aguas bajas (rebasado 275 días del año) y el caudal medio anual (altura de un rectángulo equivalente al área bajo la curva de duración).

¹³

BARDALES ESPINOZA, Walter. *Hidrología*.
<http://walterbardalesrecursoshidricos.blogspot.com/2009/12/curva-de-duracion-de-caudales.html>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

Figura 3. **Ejemplo de curva de duración de caudales**



Fuente: BARDALES ESPINOZA, Walter. *Hidrología*. <http://walterbardalesrecursoshidricos.blogspot.com/2009/12/curva-de-duracion-de-caudales.html>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

2.5. Flujo subsuperficial

El flujo subsuperficial es el resultado de la infiltración en un medio poroso por encima del nivel freático. El flujo subsuperficial, también conocido como flujo no saturado, se mueve a presión atmosférica por debajo de la superficie del terreno y puede eliminarse a través de la evaporación. por acción de la fuerza capilar, en condiciones de lluvia, se puede alcanzarse la saturación del suelo temporalmente.

Afirma que la medida de porosidad de un suelo (n) es definida por la textura del suelo y por lo general se encuentra dentro del rango de $0,25 < n < 0,75$ ¹⁴. La ecuación para determinar este valor es:

¹⁴ CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. p. 25.

$$n = \frac{\text{volumen de vacios}}{\text{volumen de agua}}$$

(Ec. 2)

2.6. Infiltración

La infiltración se define como el proceso donde el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo, producido por la acción de las fuerzas capilares y gravitacionales. La infiltración es un factor que influye en la relación lluvia escurrentía¹⁵. Define nueve factores que influyen en la capacidad de infiltración, los cuales son:

- Textura de suelo y compactación.
- Contenido de humedad inicial y humedad de saturación.
- Uso de suelo.
- Lavado de material fino.
- Temperatura.

2.7. Agua subterránea

El agua subterránea es la masa de agua que se encuentra bajo la superficie terrestre por debajo del nivel freático. Esta masa de agua tiene la capacidad de moverse acción de la gravedad y la presión hidrodinámica. Este componente del ciclo hidrológico puede acumularse y circular en formaciones geológicas permeables y porosas denominadas acuíferos.

¹⁵ APARICIO MIJARES, Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 17.

2.8. Cuenca

Una cuenca hidrográfica es una superficie terrestre delimitada por un parteaguas donde el agua drena y fluye hacia una corriente dada. A partir de ella se puede estudiar la generación de flujos de agua debido a la concentración de escurrimiento.¹⁶

2.8.1. Parte aguas

Una cuenca se diferencia de otra cuenca adyacente a través de una línea imaginaria denominada parte aguas. Esta es una división topográfica compuesta por los puntos más altos de la cuenca¹⁷.

2.8.2. Área de captación

El área de captación de la cuenca es la superficie de tierra desde la que la escorrentía fluye hacia el cauce principal y posterior desemboca en un lago o en el mar.

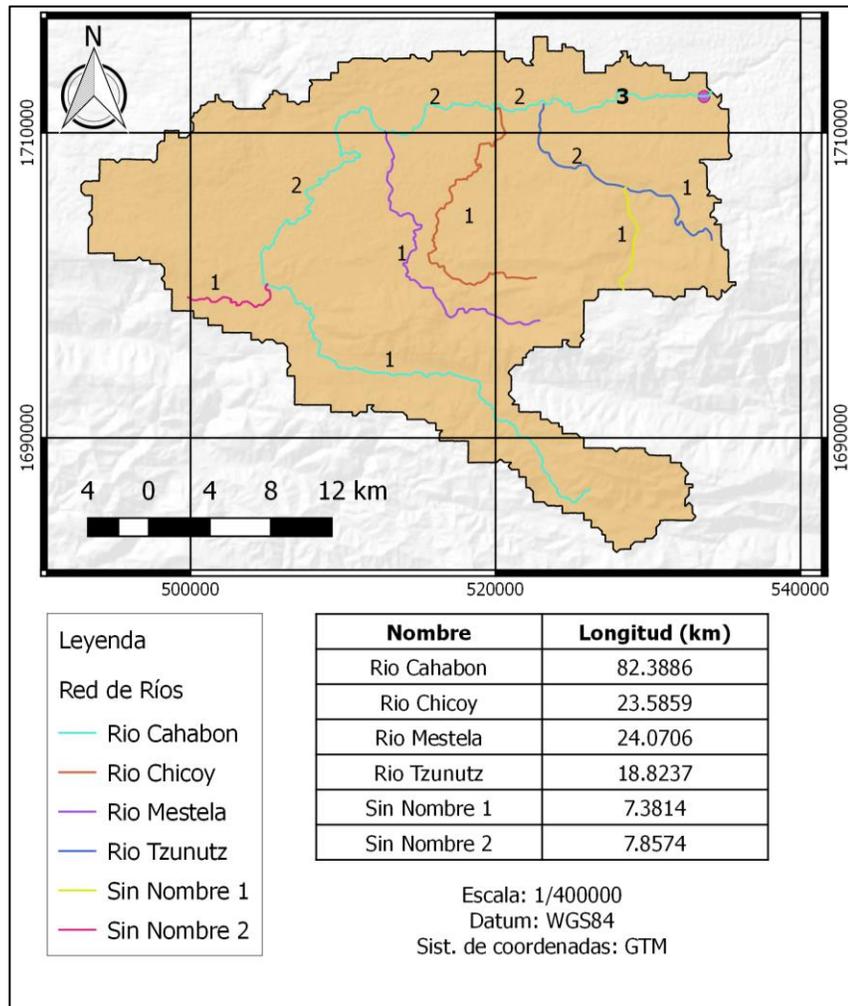
2.8.3. Red de ríos

Una cuenca cuenta con una red de ríos que permite una respuesta a los estímulos de la precipitación. La cuenca del río Cahabón posee un cauce principal de longitud total de 82,39 km. Este valor fue calculado con ayuda del *Shape* del río Cahabón y sus ramificaciones.

¹⁶ CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. p. 28.

¹⁷ Op. Cita. p. 29.

Figura 4. Red de ríos de la cuenca del río de Cahabón



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27.

La red de ríos se puede clasificar según el orden de corrientes. En este sistema existe las corrientes tributarias y la corriente principal, que es donde se unen todas las corrientes tributarias. Según la figura anterior el caso de esta cuenca es de orden 3.

A partir de la red de ríos y su longitud se puede determinar varias características y factores relevantes en el estudio geomorfológico de una cuenca.

2.8.4. Relación de bifurcación

A continuación, la ecuación número 3 describe como obtener la relación de bifurcación.

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

RB: relación de bifurcación

Ni: canales de orden i

Tabla II. Relación de bifurcación

Orden	Cauces	Rb
Orden 1	6	1,5
Orden 2	4	4
Orden 3	1	

Fuente: elaboración propia, con base en datos de la figura 4.

2.8.5. Densidad de drenaje

A continuación, la ecuación número 3 describe como obtener la densidad de drenaje.

$$D_d = \frac{L_s}{A} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

D_d: Densidad de drenaje

A: área de la cuenca

Ls: sumatoria de la longitud de los cauces

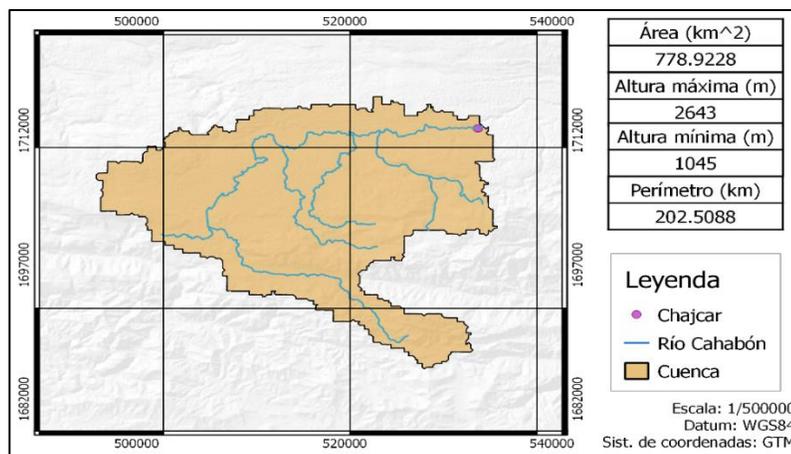
$$D_d = \frac{164,1076 \text{ Km}}{778,9228 \text{ km}^2}$$

$$D_d = 0,2107$$

2.9. Caracterización morfométrica de la cuenca

La morfología de una subcuenca o cuenca determina la respuesta hidrológica con relación a su forma. Determinar factores como el coeficiente de compacidad y el factor de forma diferencia la respuesta hidrología de dos cuencas de la misma área, pero de diferente forma.

Figura 5. Características de la forma de la cuenca del río Cahabón



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27.

2.9.1. Pendiente media

Con los datos determinados en el mapa de la figura 4 se logró determinar otras características de la cuenca como lo es la pendiente media. Este valor se obtiene aplicando la ecuación:

$$\frac{\text{Alt}_{\max} - \text{Alt}_{\min}}{L \text{ cauce principal}} = \text{pendiente media}$$

(Ec. 5)

$$\frac{2\,643\text{m} - 1\,045\text{m}}{78\,402\text{m}} = 0,0204$$

2.9.2. Coeficiente de compacidad (K_c)

Este valor representa la relación entre el perímetro de la cuenca o cuenca y el perímetro de un círculo de la misma área que la superficie de la cuenca. Un valor de coeficiente de compacidad alto representa una cuenca de forma irregular.

Tabla III. **Forma de la cuenca de acuerdo con el índice de compacidad**

K _c	Forma
≤ 1.00	Circular
1,00 – 1,25	Casi redonda a ovalada redonda
1,25 – 1,50	Oval redonda a oval oblonga
1,50 – 1,75	Oval oblonga a rectangular

Fuente: HERRERA IBÁÑEZ, Isaac. *Manual de hidrología*. p. 34.

$$k_c = \frac{P}{\sqrt{2 * \pi * A}}$$

(Ec. 6)

Donde:

K_c: coeficiente de compacidad

P: perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

$$k_c = \frac{202,5088 \text{ km}}{\sqrt{2 * \pi * 788,9228 \text{ km}^2}}$$

$$k_c = 2,8763$$

2.9.3. Factor de forma (K_f)

Este factor es la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal. Si se comparan dos cuencas de la misma área, pero diferente factor de forma, se puede decir que la cuenca con un factor de forma menor es menos vulnerable a crecidas.

Tabla IV. **Clasificación de forma de la cuenca en función del factor de forma (K_f)**

K _f	Forma
0,73	Circular
1,00	Cuadrada con salida en el punto medio de los lados
0,5	Cuadrada con salida en una esquina
0,4 – 0,5	Ovalada
≤ 0,30	Cuenca alargada

Fuente: HERRERA IBÁÑEZ, Isaac. *Manual de hidrología*. p. 35.

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

(Ec. 7)

Donde

K_f: factor de forma

A: área de la cuenca (km²)

L: longitud del cauce principal de la cuenca (km)

$$K_f = \frac{778,9229 \text{ km}^2}{82,3886 \text{ km}^2}$$

$$K_f = 0,1148$$

2.10. Balance de recarga hídrica

El 2006 dijo qué, el estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia¹⁸. Es decir, el agua que entra a un suelo es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos.

El cálculo del balance hídrico se basa en la ecuación que se fundamenta en un procedimiento de la contabilidad del agua para un sistema hidrológico dado, mediante el uso de la ecuación de continuidad.

$$R = P + HSI - ETR - HSF$$

(Ec. 8)

¹⁸ SCHOSINSKY, Gunther. *Calculo recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 13-30.

Donde:

R: Recarga potencial del acuífero

P: Precipitación efectiva

HSI: Humedad inicial del suelo

ETR: Evapotranspiración real

HSF: Humedad final del suelo

2.10.1. Cálculo de la precipitación efectiva

Para la determinación de la precipitación efectiva se utiliza la expresión creada por Schosinsky y Losilla, la cual es:

$$P_{ef} = (1 - C_{fo}) \times C_i \times P$$

(Ec. 9)

Donde:

P_{ef} : Precipitación efectiva o precipitación que es infiltrada

P: Precipitación mensual

C_i : Coeficiente de infiltración.

C_{fo} : Valor de retención vegetal

Tabla V. **Valor de retención vegetal**

Retención Vegetal (C_{fo})	Valor
Bosque	0,20
Cultivos	0,12
Edificaciones	0,10

Fuente: SCHOSINSKY, *Gunther*. *Calculo recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 13-30.

El coeficiente de infiltración, de la ecuación 9, está dado por la expresión

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

C_i : Coeficiente de infiltración

K_p : Factor de infiltración por efecto de la pendiente

K_v : Factor de infiltración por efecto de la cobertura vegetal.

K_{fc} : Factor de infiltración por efecto del suelo obtenido de la ecuación:

$$K_{fc} = 0,267 \times \ln(\text{infiltración base}) - 0,000154 (\text{infiltración base}) - 0,723 \quad (\text{Ec. 11})$$

Tabla VI. **Valores de infiltración básica por efecto de la pendiente (K_p)**

Pendiente	Porcentaje (%)	Coeficiente
Muy plana	0,02 – 0,06	0,30
Plana	0,3 – 0,4	0,20
Algo plana	1 – 2	0,15
Promedio	2 – 7	0,10
Fuerte	> 7	0,06

Fuente: SCHOSINSKY, Gunther. *Calculo recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 13-30.

Tabla VII. **Valores de infiltración base según la cobertura vegetal (K_v)**

Cobertura vegetal	Coeficiente
Zacate (< 50 %)	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Con pastizales	0,18
Bosques	0,20
Zacate (> 75 %)	0,21

Fuente: SCHOSINSKY, Gunther. *Calculo recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 13-30.

2.10.2. Cálculo de la escorrentía

La escorrentía mensual es calculada con la expresión:

$$\text{Esc} = \text{PP} - \text{Ret} - \text{PPinf}$$

(Ec. 12)

Donde:

Esc = escorrentía (mm/mes)

PP = lluvia (mm/mes)

Ret = retención (mm/mes)

PPinf = lluvia infiltrada en el suelo (mm/mes)

2.10.3. Cálculo de la evapotranspiración potencial

El valor de la Evapotranspiración potencial (ETP) inicia con el cálculo de la Evapotranspiración potencial, la cual es planteada en la sección 2.3. de la presente tesis. Posteriormente se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la evapotranspiración potencial:

$$\text{ETRP} = \frac{(\text{Hs} - \text{PMP}) (\text{ETP})}{(\text{CC} - \text{PMP})}$$

(Ec. 13)

Donde:

ETPR = evapotranspiración potencial real (mm/mes)

Hs = humedad del suelo (%)

Et = evapotranspiración de la planta a capacidad de campo (mm/mes)

CC = capacidad de campo (%)

PMP = punto de marchitez permanente (%)

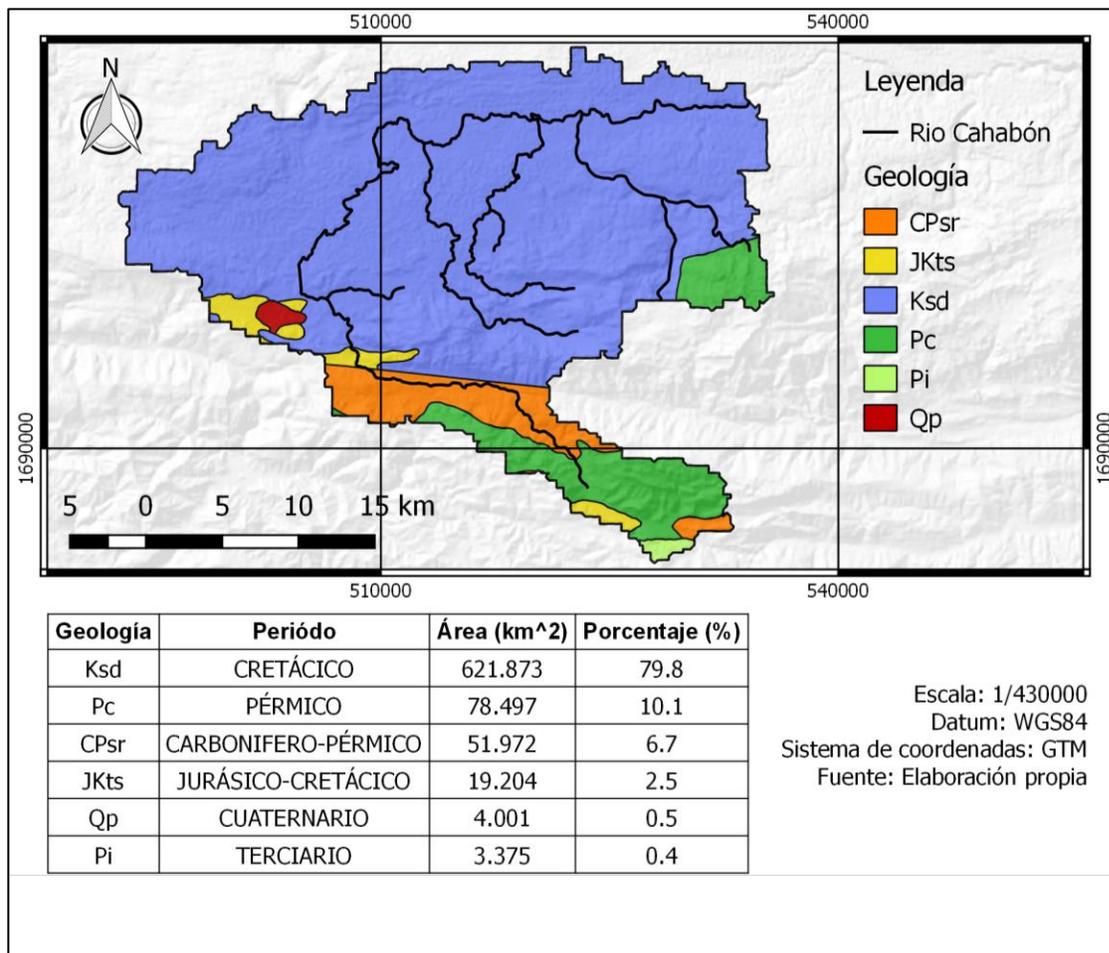
2.10.4. Geología

En la región de la cuenca del río Cahabón existen seis tipos de unidades litológicas que se caracterizan por su período de formación y el tipo de roca que lo conforma. Herrera en el 2005 habló acerca de las seis unidades litológicas presentes en la región de la cuenca y las definen como:

- Carbonatos del Cretácico (Ksd): esta unidad litológica está conformada por rocas sedimentarias de período cretácico y son Carbonatos Neocomiano-Camapanianos. Los carbonatos del cretácico representan un 78,9% del área de la región analizada.
- Carbonatos del Pérmico (Pc): son rocas de formación Chóchal, clasificadas como sedimentarias del período pérmico. En la región estudiada ocupan 78,5 km², representando un 10,1 % del área.
- Rocas sedimentarias del Carbonífero y Pérmico (CPsr): esta unidad litológica está conformada por rocas sedimentarias como las Lutitas, areniscas, conglomerados y filitas; estas pertenecen al período cretácico y abarca un 6,7 % de la microcuenca del río Cahabón.
- Formación Todos Santos (JKts): son formaciones alargadas de rocas sedimentarias como las areniscas, pertenecientes al período Jurásico-Cretácico. En la cuenca del río Cahabón ocupan un 2,5 % del área, lo cual equivale a 19,2 km².
- Cenizas Volcánicas (Qp): esta unidad litológica se caracteriza por rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen. Son rocas ígneas y metamórficas del período Cuaternario. Dentro del área de análisis estas ocupan un 0,5 % del área total de la cuenca.
- Rocas ígneas del cretácico-Jurásico (Pi): son rocas ígneas y metamórficas clasificadas como ultra básicas, predominantemente serpentinitas. Estas

se formaron en el período jurásico-cretácico y ocupan un 0,4 % de la región de la cuenca.

Figura 6. **Geología en la cuenca del río Cahabón**



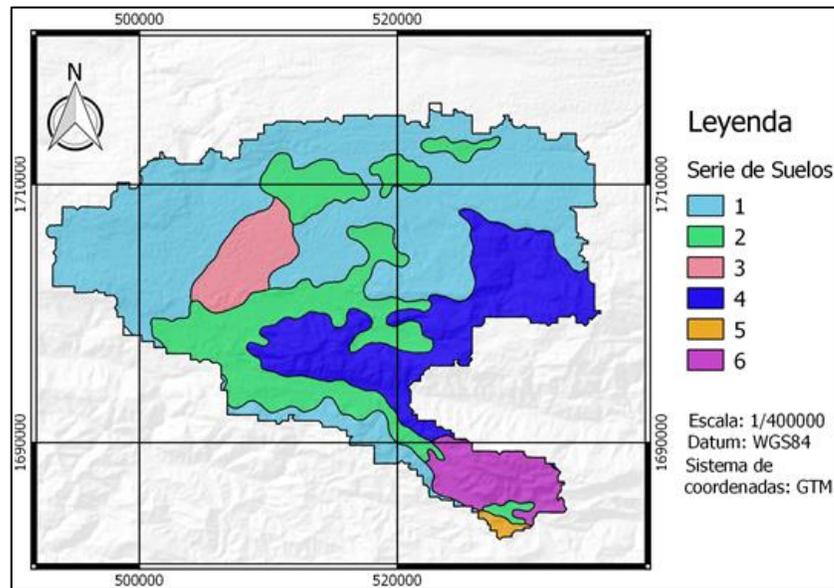
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27.

2.10.5. Taxonomía del suelo

La ONU afirma que:

- Textura: característica definida por la proporción de las clases de tamaño de partícula que componen un suelo. Las clases texturales se dividen en: Arcilla, Limo y Arena.
- Profundidad efectiva: se define como la profundidad de la capa de suelo donde ocurre la infiltración y la que recubre la base rocosa.
- Grupo hidrológico: es la clasificación del suelo que considerar la composición, textura y la profundidad del nivel freático.

Figura 7. Características del suelo de la cuenca del río Cahabón



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27.

Tabla VIII. **Características del suelo de la cuenca del río Cahabón**

#	Drenaje	Textura	PE (m)	Grupo hidri.	DA (g/cc)	CC (%)	PM (%)	Área (km ²)
1	Buen drenaje	Franca o Franca-Arcillosa	50	C	0,93	49,86	29,75	390,62
2	Buen drenaje	Franco-Limosa a Franca Arcillosa	150	B	0,96	43,13	27,41	160,59
3	Buen drenaje	Franco-Limosa	300	A	0,86	51,68	33,51	39,40
4	Buen drenaje	Franco-Limosa	150	A	0,96	46,17	28,88	141,38
5	Buen drenaje	Arcilla	30	D	1,04	39,76	20,30	3,64
6	Buen drenaje	Franca o Franca-Arcillosa	50	C	1,02	41,97	26,47	43,29

Fuente: elaboración propia.

2.11. Suelo

El suelo es un sistema natural resultado de la mezcla de minerales y restos orgánicos bajo la influencia de la intemperie¹⁹; Este es quien suministra parte de los nutrientes que requieren las plantas.

2.11.1. Uso de la tierra

El uso del suelo es el conjunto de las actividades socioeconómicas y características físicas a las que está sujeta la tierra.

¹⁹ FASSABENDER, Hans. *Química de suelos, con énfasis en los suelos de América Latina*. p. 63.

2.11.2. Capacidad de uso de la Tierra

La capacidad del uso de la Tierra es el soporte que tiene una unidad de tierra de ser utilizada para determinar el uso adecuado que se le debe de dar sin causar deterioro físico.

El instituto nacional de Bosques (INAB) ha determinado su propio sistema de clasificación de capacidad de uso de suelo relacionando este método de clasificación y datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación se presenta la siguiente tabla.

2.11.3. Intensidad de uso de suelo

La intensidad del uso de suelo se divide en tres formas de uso:

- El uso correcto de suelo: es cuando la actividad realizada en esa área no excede la capacidad del suelo, por lo que no causará daños o modificaciones indeseadas a las características de fertilidad o de fisiografía.
- El subuso de la tierra: hace referencia de que en términos físicos el suelo está siendo utilizado en menor intensidad a la que puede resistir.
- Sobre uso de la tierra: es cuando el suelo está sujeto a un uso que supera su capacidad física, causando consecuencias negativas en sus propiedades químicas, físicas y hasta biológicas.

Tabla IX. **Capacidad de uso de la tierra según el INAB**

Capacidad (INAB)	% Área	Área (Ha)	Aptitud de uso	% Área	Área (Ha)
Agricultura sin limitaciones –A-	16,02	1 744 564,74	Actividades agropecuarias	32,67	3 557 786,64
Agricultura con mejoras –Am-__	16,65	1 843 221,90			
Agroforestería con cultivos anuales – Aa-	17,69	1 926 611,65	Actividades agropecuarias con cobertura forestal	33,11	3 605 031,83
Sistemas Silvopastoriles –Ss-	8,51	926,101,98			
Agroforestería con cultivos permanentes –Ap-	6,91	752 318,19			
Tierras forestales para producción –F-	16,92	1 842 139,74	Tierras forestales	32,75	3 565 755,71
Tierras forestales para protección – Fp-	4,00	435 043,71			
Áreas protegidas – App-	11,83	1 288 572,26			
Cuerpos de agua	1,47	160 325,82	Cuerpos de agua	1,47	160 325,82
	100	108 889,00		100	108 889,00

Fuente: Ministerio de Ambiente y recursos Naturales. *Informe ambiental del estado de Guatemala*. <https://www.marn.gov.gt/Multimedios/8879.pdf>. Consulta: 7 de febrero del 2020.

2.11.4. Cambio de uso de suelo

El cambio de uso de suelo es el proceso mediante el cual el ser humano utiliza un espacio físico que originalmente estaba destinado a otra actividad, este puede ser motivado por diferentes tipos de impulsores, como:

- Causas próximas o directas (acciones físicas humanas que alteran directamente el paisaje).

- Fuerzas motrices subyacentes (fuerzas sociopolíticas, económicas y culturales que sustentan las causas próximas).

Muñoz, Sarmiento y Edier dicen que el cambio de uso de suelo se manifiesta como un factor que ha generado grandes impactos negativos en el suelo, como lo es la deforestación, pérdida de biodiversidad, aceleración de procesos erosivos, pérdida de nutrientes del suelo y la disminución de retención de agua.

2.12. Caracterización socioeconómica de la cuenca del río Cahabón

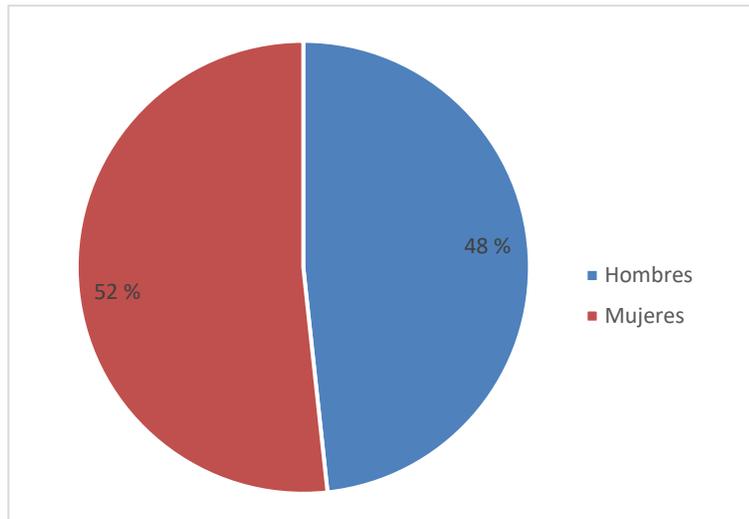
A continuación, se buscó caracterizar la población que habita la cuenca del río Cahabón a partir de la generación de información estadística que describe características económicas, de género y del nivel de educación de las personas de la región.

2.12.1. Demografía

Según el censo nacional realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2002, se conoce que en la cuenca del río Cahabón habita un total de 159 120; de los cuales 76 842 son hombres y 82 278 son mujeres.

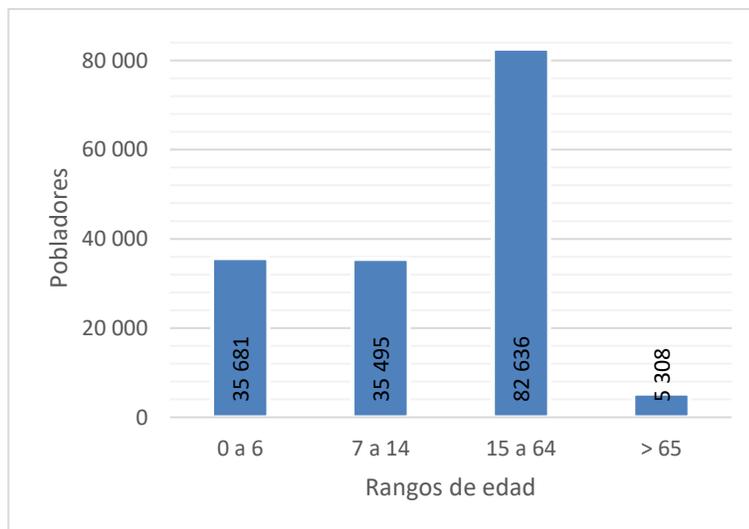
Según los datos de la figura 8, la mayor parte de la población se encuentra entre los 15 a 64 años mientras que la menor cantidad de pobladores se condensa en un rango de edad de 65 o más años.

Figura 8. **Población por género**



Fuente: elaboración propia, con datos del INE, censo 2002.

Figura 9. **Población por grupos etarios**

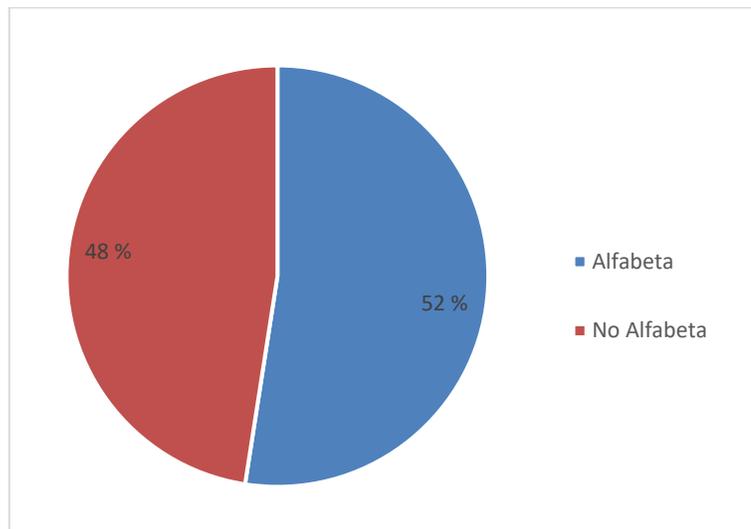


Fuente: elaboración propia, con datos del INE, censo 2002.

2.12.2. Educación

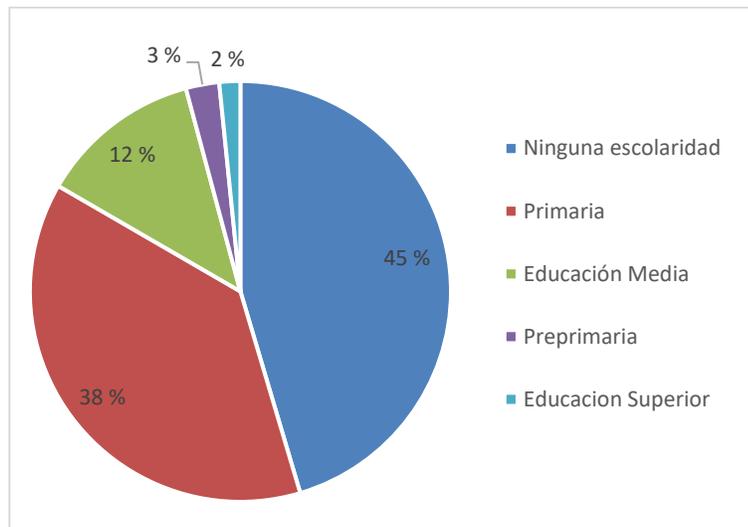
Se logró determinar que en la cuenca del río Cahabón solo el 52 % de la población es alfabeta. Además, el nivel de escolaridad que predomina en la región es el nivel primario, representado por un 38 % de la población. Tan solo 1 991 personas cuentan con educación superior, dato que representan el 2 % de la población en la cuenca del río Cahabón.

Figura 10. Alfabetización en la cuenca del río Cahabón



Fuente: elaboración propia, con datos del INE, censo 2002.

Figura 11. Nivel de escolaridad en la cuenca del río Cahabón



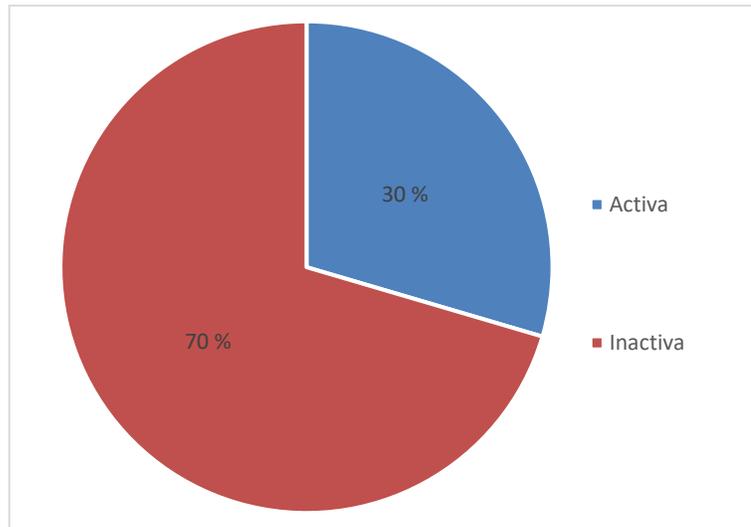
Fuente: elaboración propia, con datos del INE, censo 2002.

2.12.3. Población económicamente activa

Como muestra la figura 11, en la cuenca del río Cahabón tan solo el 30 % de la población es económicamente activa.

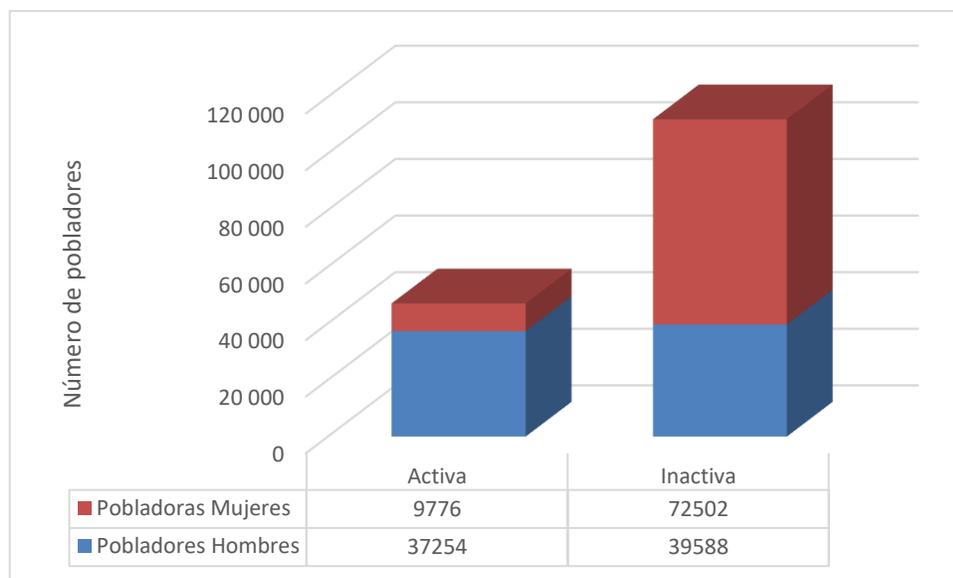
De la población económicamente activa 37 254 son hombres, quienes representan un 79,2 % de la población activa. Las mujeres representan un 20,8 % siendo que 9 776 mujeres son económicamente activas.

Figura 12. **Población activa e inactiva económicamente**



Fuente: elaboración propia, con datos del INE, censo 2002.

Figura 13. **Población activa e inactiva económicamente por género**



Fuente: elaboración propia, con datos del INE, censo 2002.

2.13. Modelos de lluvia escorrentía

Relacionar la lluvia y la escorrentía en un modelo nos permite complementar estudios de una cuenca y aplicarlos en proyectos tales como: planes de restauración ambiental, pronóstico de inundaciones, diseño de reservorios de almacenamiento de agua, entre otras.

Para generar un modelo de lluvia escorrentía se debe conocer ciertas características tanto morfométricas como climatológicas de la cuenca a analizar. A su vez se conoce que existen Softwares que facilitan la generación de este tipo de modelos, tales como: HEC-HMS, HBV y QSWAT.

2.14. Variables a utilizar en el Software HEC-HMS 4.4

El Software HEC-HMS, versión 4.4, es un programa diseñado para simular los procesos hidrológicos del sistema de una cuenca, subcuenca o microcuenca. El software incluye análisis hidrológico tradicional, así como procesos necesarios para una simulación continua incluyendo procesos de evapotranspiración, deshielo y valores de humedad del suelo.

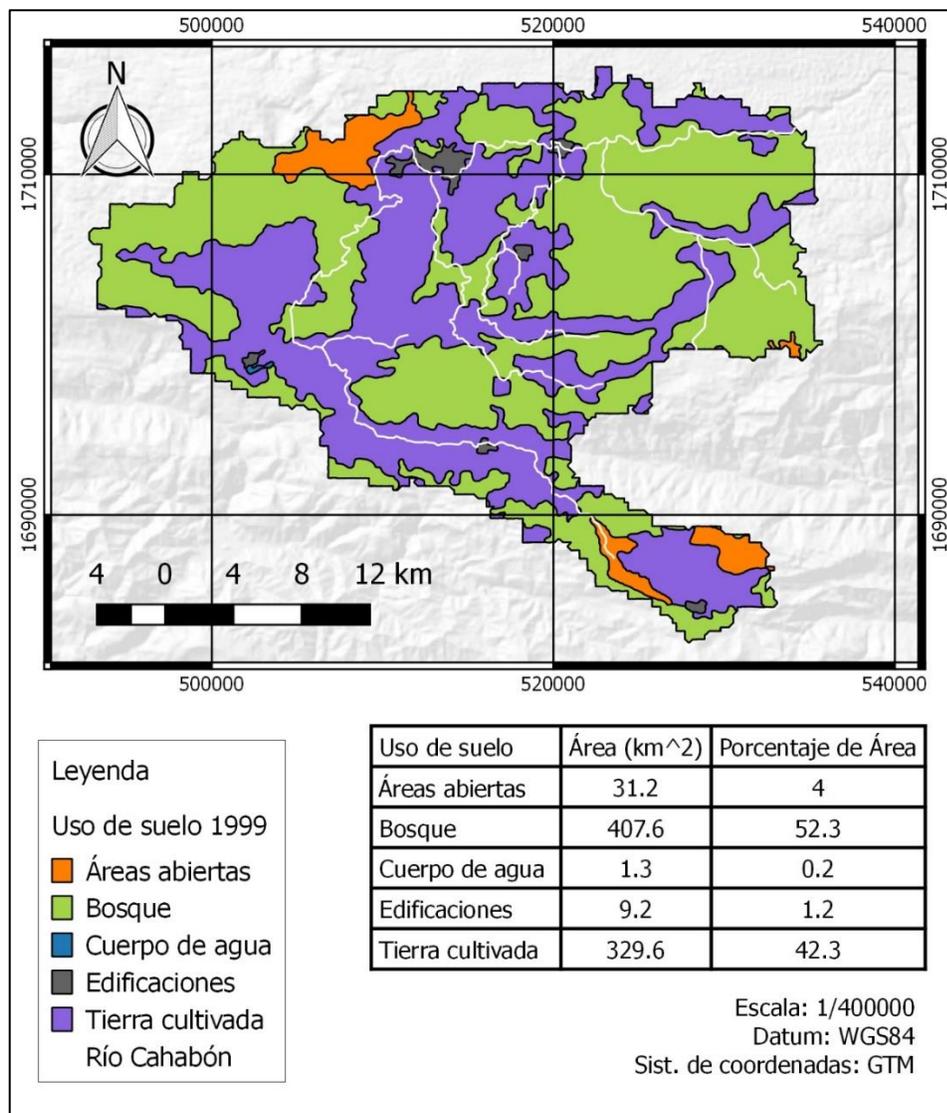
2.14.1. Determinación del uso de suelo según datos del MAGA

El ministerio de agricultura, ganadería y alimentación posee mapas de información del uso del suelo digitalizado de los años 1999, 2005 y 2010. Dicha información se aprovechó en este estudio determinando las siguientes clasificaciones de uso de suelo:

- Tierra cultivada.
- Bosques.

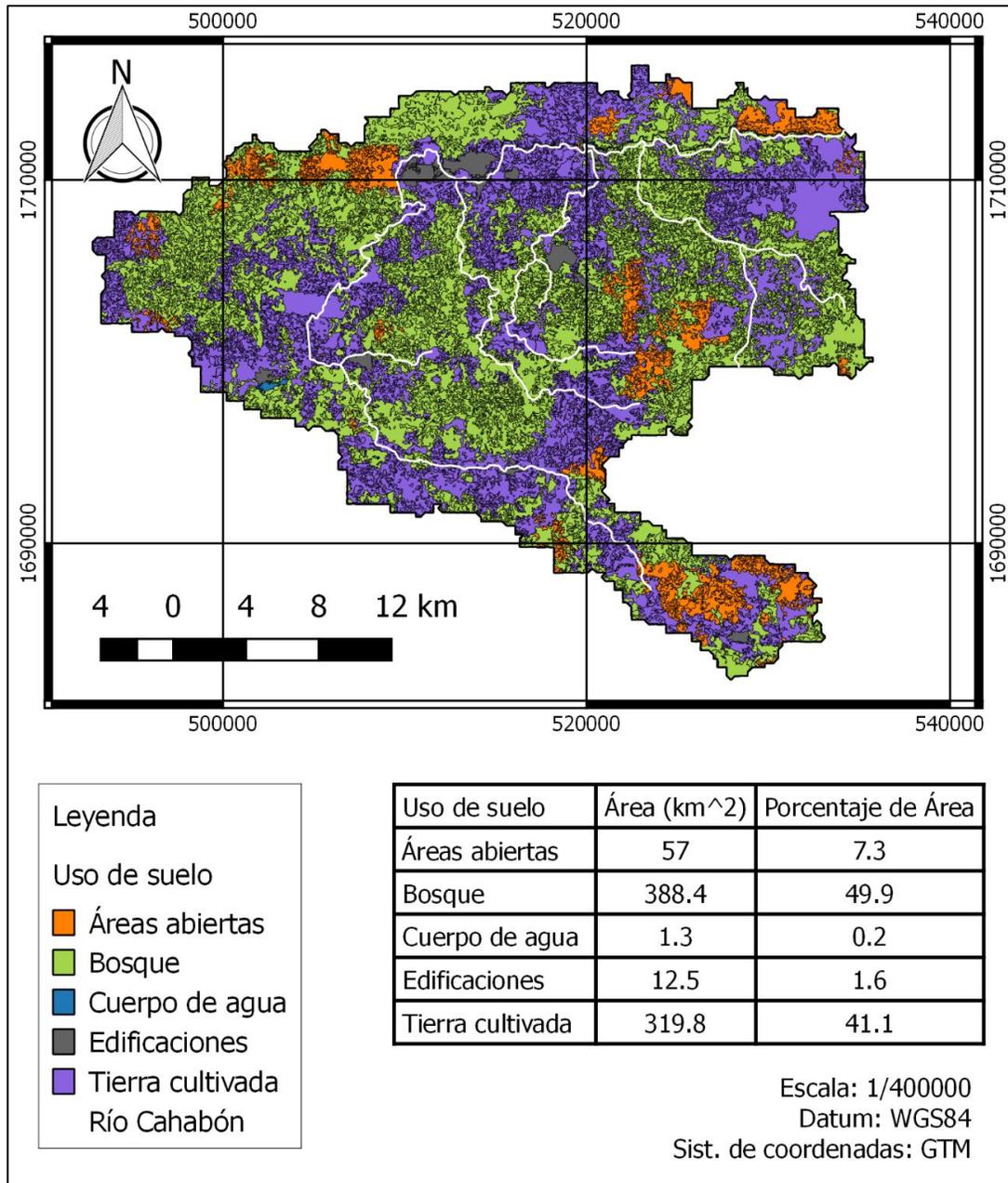
- Áreas abiertas (pastizales, cementerios, praderas, entre otros).
- Edificaciones.
- Cuerpos de agua.

Figura 14. **Reclasificación del uso de suelo 1999 en la cuenca del río Cahabón**



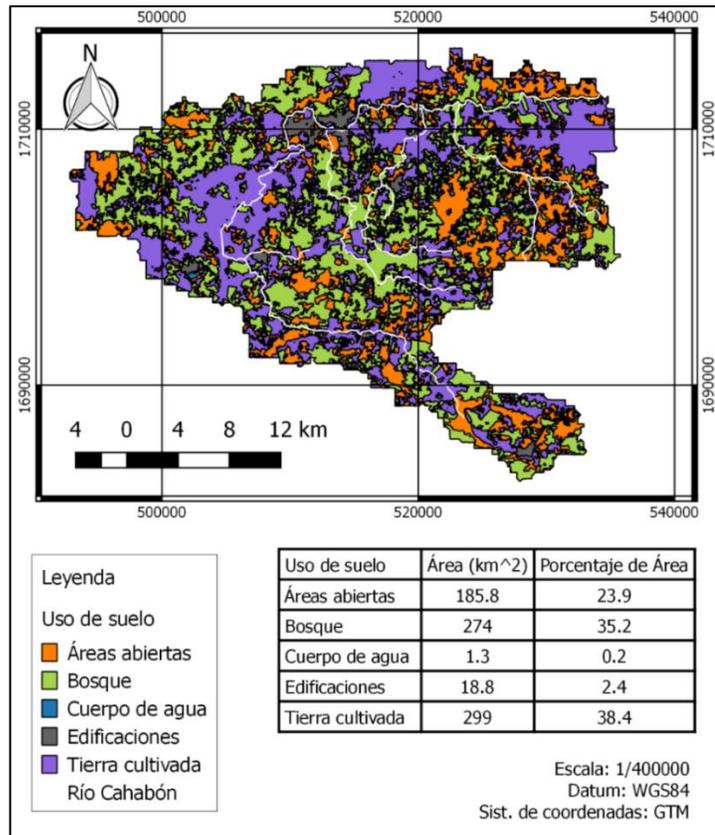
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27. Con datos del MAGA 1999.

Figura 15. **Reclasificación del uso de suelo 2005 en la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27. Con datos del MAGA 2005.

Figura 16. **Reclasificación del uso de suelo 2010 en la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27. Con datos del MAGA 2010.

2.14.2. Determinación del uso de suelo a partir de imágenes satelitales

Para la determinación del uso de suelo de los años 2015 y 2018, se utilizó la información de imágenes Landsat 8 proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos²⁰. Estas imágenes tienen una resolución espacial

²⁰ MASEK, Jeffrey; TAYLOR, Michael. About Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>. Consulta: 13 de enero de 2020

moderada, con capacidad de analizar en la cobertura global y para caracterizar procesos a escala humana, como el cambio de uso de suelo.

Las imágenes de Landsat contienen bandas espectrales que miden rangos de longitudes de onda del espectro electromagnético²¹. Una imagen del satélite Landsat 8 contiene nueve bandas espectrales y dos bandas espectrales detectadas con sensor termal infrarrojo.

Tabla X. **Bandas Espectrales de Landsat 8**

Banda	Longitud onda (µm)	Resolución (m)	Tipo de información que capta la Banda espectral
1	0,43-0,45	30	Agua poco profunda, partículas finas de polvo
2	0,45-0,51	30	Agua profunda, atmósfera
3	0,53-0,59	30	Vegetación
4	0,64-0,67	30	Edificaciones, suelo, vegetación
5	0,85-0,88	30	Costas, vegetación
6	1,57-1,65	30	Penetración de las nubes, humedad del suelo y vegetación
7	2,11-2,29	30	Penetración mejorada de las nubes, humedad del suelo y la vegetación
8	0,50-0,68	15	Imágenes en blanco y negro, detalles más nítidos
9	1,36-1,38	30	Nubes de tipo cirrus
10	10,6-11,2	100	Representación térmica, humedad estimada del suelo. *
11	11,5-12,5	100	Representación térmica mejorada, humedad estimada del suelo. *

* Banda espectral perteneciente al sensor termal infrarrojo.

Fuente: elaboración propia, con información de *Landsat 8 Instruments*, USGS 2013 y comparar combinaciones de bandas, ERIS 2015.

²¹ USGS. *Landsat 8 Instruments*. <https://www.usgs.gov/land-resources/>. Consulta: 13 de enero de 2020.

Para facilitar el análisis visual de las imágenes Landsat 8 se aplica la combinación de bandas espectrales que a continuación se desglosan:

Tabla XI. **Combinación de bandas espectrales**

Combinación	Resultado	Generalidades
3,2,1	Color natural	<ul style="list-style-type: none"> • Tonalidades azules: presencia de agua • Tonalidades verdes: vegetación • Tonalidades de marrón: Suelo • Tonos amarillentos y plateados: suelo desnudo. • Tonos verdes/negro: Bosque
4,3,2	Infrarrojo o falso color	<ul style="list-style-type: none"> • Tonos Rojo – magenta: cultivos regados. • Tonos Rosa: Praderas, pastizales • Tonos Blanco-Beige: Áreas de escasa o nula vegetación, suelos desnudos. • Tonos Azul oscuro a negro: áreas cubiertas por agua. En zonas volcánicas los tonos negros pueden asimismo identificar flujos de lava. • Tonos Gris a azul metálico: Áreas pobladas.
4,5,3	Realce de Agua y Tierra	<ul style="list-style-type: none"> • Realza con gran detalle los límites entre el agua y la tierra. • Tonos colores marrones, verdes y naranjas: diferentes tipos de vegetación. • Tonos azul-negro: cuerpos de agua y suelo húmedo.
5,4,2	Falso color RGB 5,4,2	Se resaltan las carreteras y los caminos rurales.

Fuente: elaboración propia, con información del satélite Landsat.

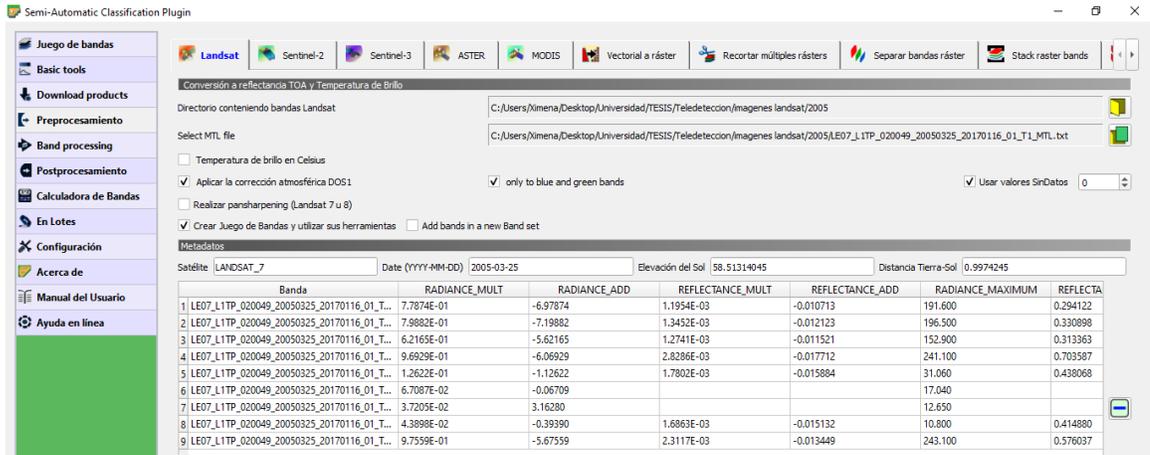
Manteniendo la homogeneidad de los datos del uso de suelo, para el año 2015 y 2018 se categorizaron los usos de suelo según:

- Tierra cultivada.
- Bosques.
- Áreas abiertas (pastizales, cementerios, entre otros).
- Edificaciones.
- Cuerpos de agua.

El Procedimiento para análisis de imágenes satelitales inició descargando los datos necesarios proporcionados por el USGS a través de su página: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. En ella se definieron los parámetros de la imagen satelital a buscar, como es la fecha y área de interés. Las imágenes de Landsat 8 se analizaron con apoyo del Software QGIS. 3.8.1. La información se hace compatible con QGIS al usar el complemento de clasificación semiautomática, SCP, que permite la clasificación supervisada de imágenes de teledetección, proporcionando herramientas para la descarga y el preprocesamiento de imágenes.

Una vez descargadas las imágenes Landsat se procede a preprocesar con la herramienta de *semi-automatic Classification pluggin*. Esta herramienta permite la clasificación supervisada de imágenes de teledetección, donde se realiza una conversión de los niveles digitales a reflectancia TOA y temperatura de brillo. Este proceso reduce errores causados por efectos atmosféricos, como perturbaciones derivadas por dispersión atmosférica. En otras palabras, se corrigen los efectos provocados cuando la radiación electromagnética es reflejada por gases o partículas suspendidas en la atmósfera, afectando la radiación directa e incrementando la radiación difusa.

Figura 17. **Herramienta de Preprocesamiento de Semi-Automatic Classification Pluggin**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1.

Posteriormente se creó un set de bandas cargando la información raster convertidas a reflectancia TOA, excluyendo las bandas 1, 9, 10 y 11. Con la función de *semi-automatic Classification plugin* se generó un raster virtual de juego de bandas y se especificó que la información corresponde a las imágenes Landsat 8 representadas en longitud de onda, dada en micrómetros.

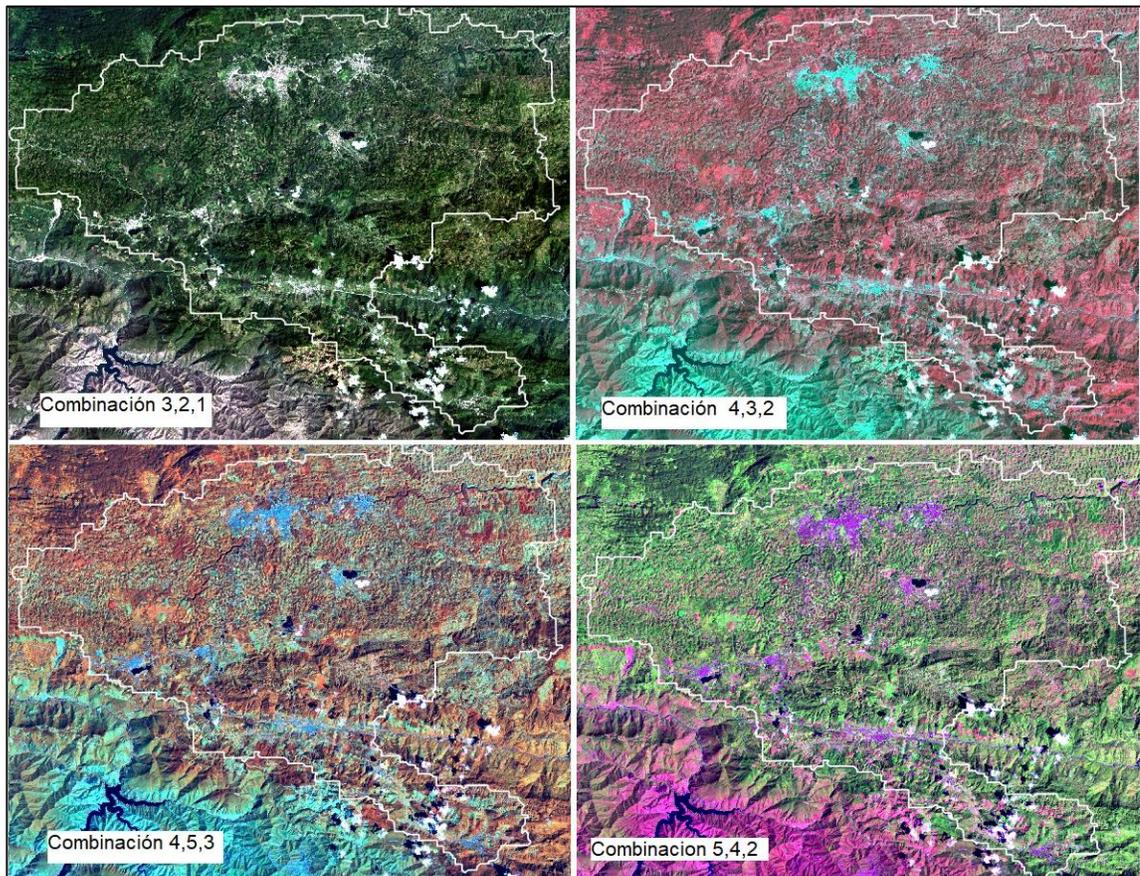
Figura 18. Generación del Banda set 1



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1.

Una vez preprocesada la información raster se dio inicio al análisis visual de las imágenes empleando la combinación de bandas de la tabla VIII.

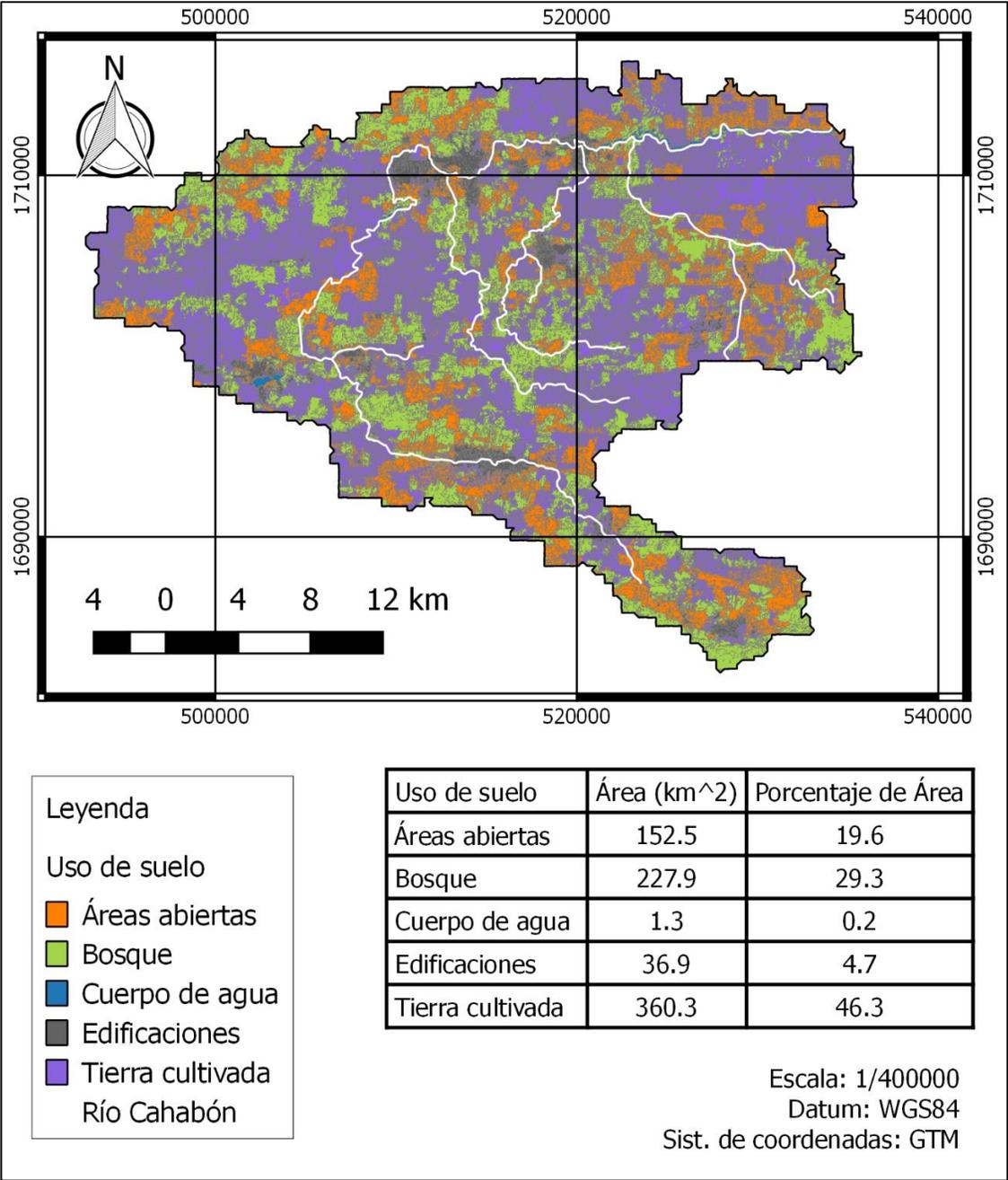
Figura 19. **Resultado de la combinación de bandas**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1.

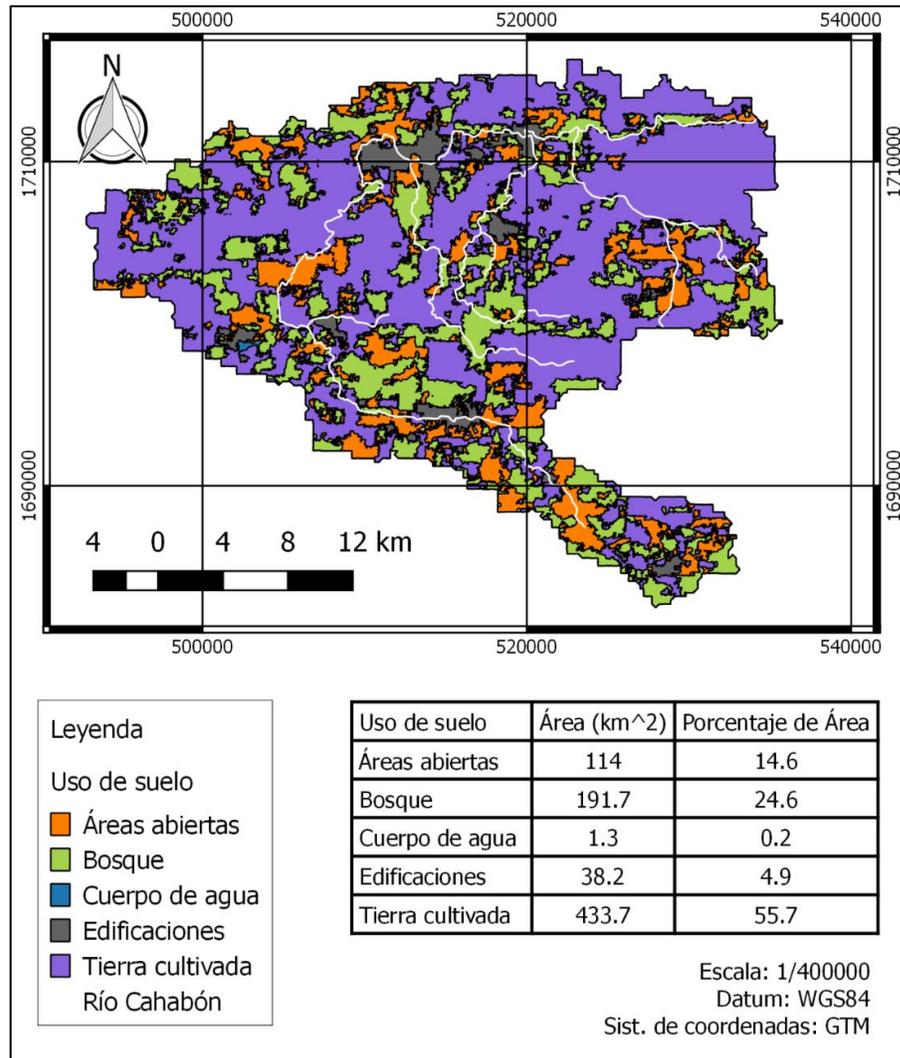
A partir del análisis de las imágenes satelitales con diferentes combinaciones de bandas espectrales fueron la delimitación del uso de suelo. A continuación, se presentan los resultados en formato de mapa de uso de suelo para el año 2015 y 2018.

Figura 20. **Reclasificación del uso de suelo 2,015 en la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1. Información satelital Landst 8, 2015.

Figura 21. **Reclasificación del uso de suelo 2,018 en la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1. Información satelital Landst 8, 2018.

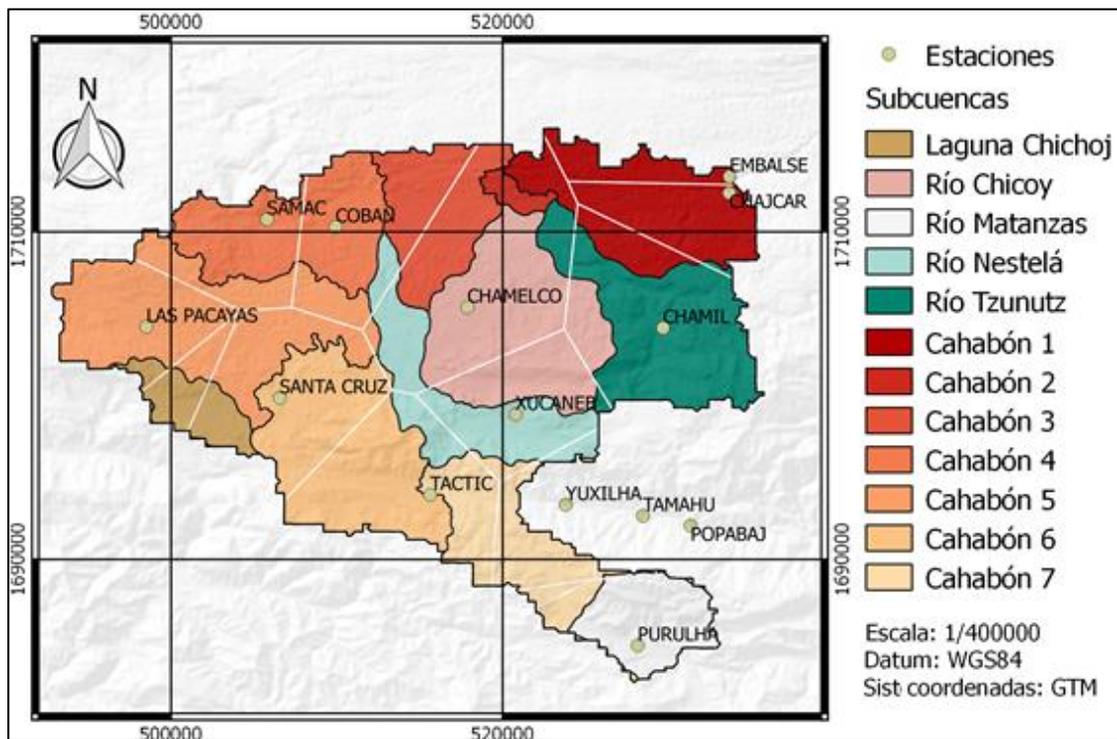
2.14.3. Lluvia

La información de precipitación de lluvia en la cuenca del río Cahabón se ha obtenido de estaciones meteorológicas de INSIVUHEMEH, INDE y estaciones

de propiedad privada. En complemento a las estaciones se ha utilizado información satelital, para el relleno de datos faltantes. En este caso se ha utilizado la información que brinda el satélite CHIRPS.

La serie de lluvia media anual se obtuvo de la ponderación de las áreas de influencia con cada estación meteorológica. A continuación, se presentan las estaciones meteorológicas y subcuencas que conforman la Cuenca del Río Cahabón. Posterior se calculó el peso ponderado, que se muestra en la tabla XII.

Figura 22. **Estaciones meteorológicas y subcuencas de la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1.

Tabla XII. **Área de influencia de las estaciones meteorológicas**

Subcuenca	Estación	Área ponderada
Cahabón 1	Chajcar	0,4964
	Chamelco	0,1149
	Chamil	0,1728
	Embalse	0,2159
Cahabón 2	Chamelco	1,0000
Cahabón 3	Chamelco	0,5628
	Cobán	0,4372
Cahabón 4	Cobán	0,5061
	Samac	0,4939
Cahabón 5	Chamelco	0,0116
	Cobán	0,0868
	Las Pacayas	0,4676
	Samac	0,1380
	Santa Cruz	0,2960
Cahabón 6	Chamelco	0,0055
	Santa Cruz	0,4619
	Tactic	0,5326
Cahabón 7	Popabaj	0,0029
	Purulha	0,1514
	Tactic	0,3680
	Tamahú	0,0143
	Xucaneb	0,0442
	Yuxilhá	0,4193
Laguna Chichoj	Las Pacayas	0,3846
	Santa Cruz	0,6154
Río Chicoy	Chamelco	0,5948
	Chamil	0,1204
	Xucaneb	0,2848
Río Matanzas	Popabaj	0,0685
	Purulha	0,8968
	Tamahú	0,0348
Río Nestelá	Chamelco	0,2512
	Cobán	0,0795
	Tactic	0,1542
	Xucaneb	0,4596
	Yuxilhá	0,0555
Río Tzunutz	Chajcar	0,0080
	Chamelco	0,0844
	Chamil	0,8956
	Xucaneb	0,0119

Fuente: elaboración propia.

2.14.4. Curva número

La curva número de una cuenca o subcuenca es un valor que determina la cantidad de lluvia que genera escorrentía basado en la cobertura del suelo y el grupo hidrológico del mismo. Entre mayor sea el valor de la curva número mayor será la cantidad de lluvia que se convertirá en escorrentía.

El valor de la curva número tiende a cambiar según sea los antecedentes de humedad, es decir si el suelo se encuentra en condiciones secas, normales o húmedas.

Para el caso de la Curva de número II, en condiciones normales, se utiliza valores predeterminados por el *Soil Conservation Service*, que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla XIII. **Curva número en función de grupo hidrológico y uso del suelo, para condiciones normales (CN II)**

Descripción del uso de la tierra		Grupo Hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada	Sin tratamientos de conservación	72	82	88	91
	Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Vegas de ríos	Condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques	Troncos delgados, cubierta pobre	45	66	77	83
	Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, cementerios, césped	Óptimas condiciones	39	61	74	80
	Condiciones aceptables	49	69	79	84
Edificaciones	Residenciales	51	68	79	84

Fuente: USDA Soil Conservation Service. *National Engineering Handbook*. p. 18.

Para determinar el valor de la Curva Número I, cuyo antecedente de humedad es estado seco, la ecuación correspondiente está dada por:

$$CN I = \frac{4,2 CN II}{10 - 0,058 CN II} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

CN I: curva número en condiciones secas

CN II: curva número en condiciones normales

Si se desea conocer la curva número III, correspondiente para condiciones húmedas, se debe aplicar la ecuación:

$$CN III = \frac{23 CN II}{10 + 0,13 CN II} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

CN III: curva número en condiciones húmedas

CN II: curva número en condiciones normales

El valor promedio de la curva número para una cuenca dada, en cualquiera de las tres condiciones de humedad, está dado por una ponderación del valor de la curva número, descrita como:

$$CN_{\text{Ponderada}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (\text{Ec. 16})$$

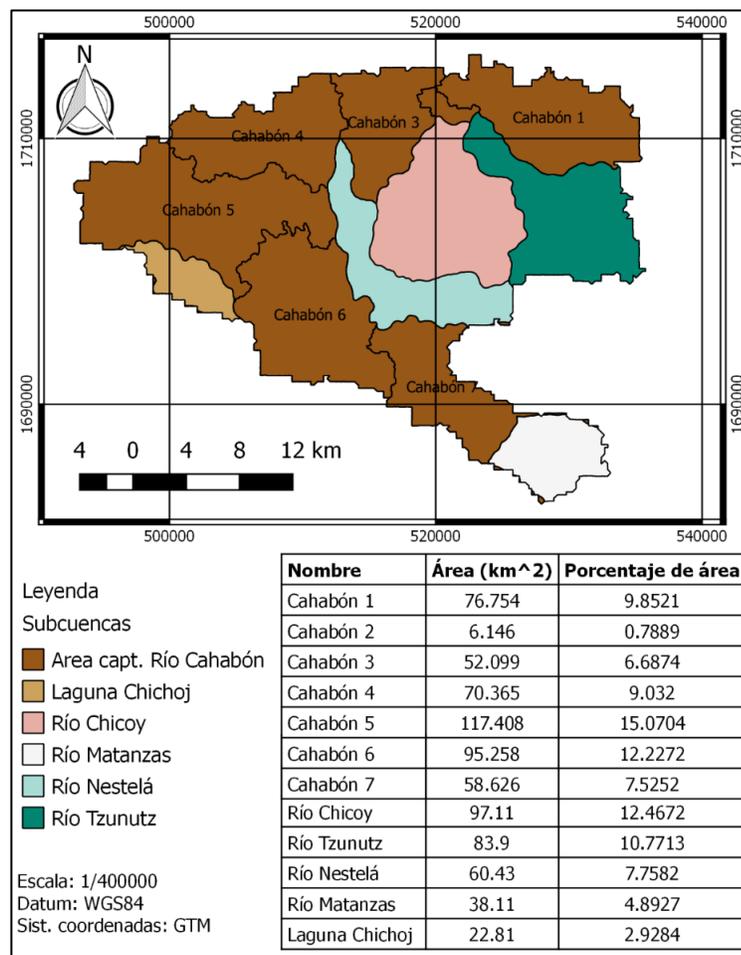
Donde:

A_i : área que ocupa cierta porción de suelo con curva número.

CN_i: curva número correspondiente a A_i .

Para la aplicación de la curva número en el software de modelación de HEC-HMS se debe determinar el valor ponderado correspondiente a cada subcuenca que conforman la cuenca del río Cahabón.

Figura 23. **Subcuencas de la Cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.18.27. Información del IGN, 1978.

2.14.5. Tiempo de concentración y tiempo de retardo

El tiempo de concentración se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca aporten escorrentía al punto de salida. Según Ibañez, Asencio y otros en el 2010 plantearon que el cálculo del tiempo de concentración de una cuenca hidrográfico es uno de los aspectos básicos a determinar a la hora de gestionar y conservar los recursos agua y suelo

$$T_c \text{ SCS} = \frac{3 * L^{1,3}}{(220 * (H_f - H_i)^{0,5}) * (\frac{1000}{\text{CN(III)}} - 9)^{0,7}}$$

(Ec. 17)

Dónde:

T_c SCS: Tiempo de concentración

CN(III): curva número 3

L: longitud del cauce principal

H_f: cota inicial

H_i: cota final

La obtención del valor del tiempo de retardo de una cuenca se considera como el 60 % del tiempo de concentración.

$$T_r = T_c \text{ SCS} * 60 \%$$

(Ec. 18)

Tabla XIV. **Valores para determinar el tiempo de concentración según metodología SCS**

Cauce	Subcuenca	Longitud (m)	Elevación 1 (m)	Elevación 2 (m)
Rio Cahabon	Cahabón 1	13 153,0000	1 139,0000	1 137,0000
Rio Cahabon	Cahabón 2	4 443,4000	1 284,0000	1 137,0000
Rio Cahabon	Cahabón 3	9 537,1000	1 304,0000	1 284,0000
Rio Cahabon	Cahabón 4	11 748,0000	1 401,0000	1 304,0000
Rio Cahabon	Cahabón 5	11 516,9000	1 401,0000	1 379,0000
Rio Cahabon	Cahabón 6	14 516,0000	1 452,0000	1 379,0000
Rio Cahabon	Cahabón 7	15 019,0000	1 562,0000	1 452,0000
Sin Nombre	Laguna Chichoj	5 853,0000	1 434,0000	1 392,0000
Rio Chicoy	Río Chicoy	23 585,9000	1 621,0000	1 285,0000
Rio Cahabon	Río Matanzas	2 470,0000	1 641,0000	1 562,0000
Rio Mestela	Río Nestelá	24 070,6000	1 814,0000	1 303,0000
Rio Tzunutz	Rio Tzunutz	18 823,7000	1 985,0000	1 344,0000

Fuente: elaboración propia.

2.14.6. Capacidad de Almacenamiento

La capacidad de almacenamiento, según el sistema desarrollado por el SCS, define que este valor está dado según la ecuación:

$$S = \left(\frac{1\ 000}{CN} - 10 \right) * 25,4$$

(Ec. 19)

Donde:

S: capacidad de almacenamiento de la cuenca en milímetros.

CN: curva número en cualquier condición de humedad.

El proceso de infiltración, según la metodología del SCS, también se puede relacionar con el valor del almacenamiento y por tanto se ve influenciado por el valor de la Curva Número. Para el presente informe se hizo utilidad de la capacidad de almacenamiento para las condiciones de suelo normales que a continuación se muestran en formato de tabla.

Tabla XV. **Capacidad de almacenamiento para suelo en condiciones normales**

Subcuenca	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabón 1	92,38	67,26	64,79	51,51	49,13
Cahabón 2	76,10	78,41	72,47	76,86	76,57
Cahabón 3	207,82	63,18	68,49	68,56	63,08
Cahabón 4	64,46	101,29	90,28	84,85	76,11
Cahabón 5	85,84	102,91	83,00	77,78	71,94
Cahabón 6	103,70	167,03	157,10	142,02	147,45
Cahabón 7	141,69	113,72	126,32	123,96	127,46
Laguna Chichoj	81,54	79,46	72,77	72,02	68,79
Río Chicoy	111,99	110,16	103,65	100,35	81,09
Río Matanzas	55,00	63,46	68,21	76,26	66,91
Río Nestelá	192,40	191,85	182,50	133,37	119,15
Río Tzunutz	261,21	247,78	194,29	175,13	143,50

Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

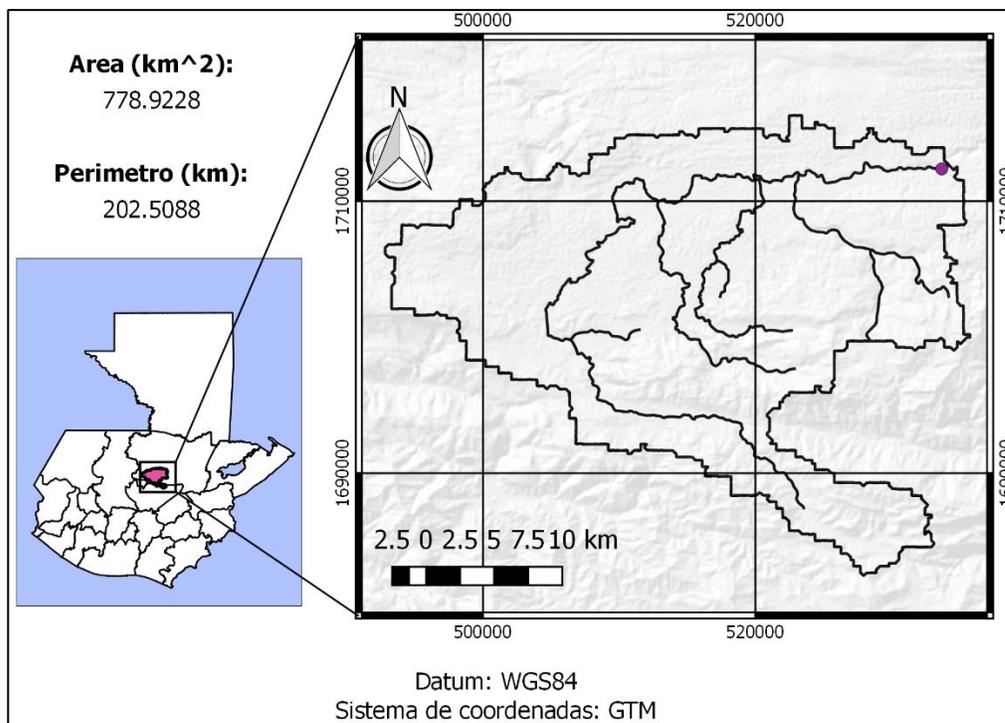
- Variables independientes según Ven Te Chow en su libro de Hidrología Aplicada:
 - Características morfométricas de la cuenca: son los valores que describen la respuesta hidrológica en relación con su forma. (pendiente media, coeficiente de compacidad, factor de forma, entre otros).
 - Precipitación mensual y anual: agua que cae de la atmosfera hacia la superficie terrestre representada en periodos mensuales y anuales.
 - Uso del suelo: término que implica la gestión y modificación del entorno natural.
 - Evapotranspiración potencial: proceso combinado de evaporación y el mecanismo mediante el cual plantas y animales absorben humedad y la transpiran al aire en forma de vapor.
 - Infiltración: proceso donde el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo, producido por la acción de las fuerzas capilares y gravitacionales.

- Variable dependiente
 - Caudal del río Cahabón: es el flujo volumétrico de agua que se transporta por la cuenca del río Cahabón.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Para determinar el impacto del cambio de uso de suelo en el caudal del río Cahabón se realizó una investigación cuantitativa comparativa. En la investigación se evaluó el impacto del cambio de uso de suelo de la cuenca del río Cahabón en el caudal del río de mismo nombre. Dicho análisis se realizó con datos dentro del período de años desde 1999 hasta el 2018. La cuenca se encuentra ubicada en la vertiente del Caribe, en la región del departamento de Alta Verapaz. Para la delimitación y análisis de la cuenca se utilizó como punto de control la estación hidrométrica Chajcar ubicada en las coordenadas Y:533673.649 y X:1712397.966.

Figura 24. **Ubicación de la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1. Con base en datos del IGN.

3.3. Recursos humanos disponibles

Las personas involucradas en realizar y orientar la investigación son:

- Investigadora: Br. Ximena Vargas López
- Asesor: Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

3.4. Recursos materiales disponibles

Para el desarrollo de la investigación se hizo uso de datos proporcionados por instituciones y ministerios tales como el Instituto Guatemalteco Geográfico (IGN), Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), Instituto nacional de boques (INAB), Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). De ellas se recuperó:

- *Shape file* de taxonomía de suelo
- *Shape file* de Serie de suelo
- *Shape file* de uso de suelo 1999, 2005 y 2010
- *Shape file* de cuencas y vertientes
- *Shape file* de Ríos en Guatemala
- Modelo de Elevación digital para Guatemala
- Base de datos de estaciones hidrométricas y meteorológicas

También se hizo uso imágenes de Landsat que ofrece el registro global continuo más largo de la superficie de la Tierra, de información espectral de la superficie de la Tierra, brindando la capacidad de evaluar los cambios en el paisaje de la Tierra²².

²² MASEK, Jeffrey; TAYLOR, Michael. *About Landsat Science*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>. Consulta: 13 de enero de 2020.

- Imágenes satelitales de Landsat 8

Por último, para el relleno de información de precipitación mensual y anual, se hizo uso de la información proporcionada por el satélite CHIRPS.

3.5. Técnica cuantitativa

La investigación fue de carácter cuantitativo-comparativo. En ella se evaluó el valor del caudal a través del tiempo, comparándolo con el cambio de uso del suelo.

El trabajo de investigación inició con la delimitación espacial y caracterización de la cuenca del río Cahabón siguiendo los pasos que a continuación se mencionan:

- Delimitación de la cuenca del río Cahabón a partir de la estación hidrométrica de Chajcar.
- Ubicación de las estaciones hidrométricas con influencia sobre la cuenca de nombres: Santa Cruz, Purulha, Xucaneb, Las Pacayas, Chamil, Tactic, Chamelco, Cobán.
- Obtención de los registros históricos de las condiciones meteorológicas de las estaciones; así como el relleno de las series utilizando CHIRPS.
- Determinación del hietograma de los últimos 10 años.
- Generación de los mapas de las características geológicas, morfológicas, taxonómicas y físicas de la cuenca del río Cahabón.
- Determinación del uso de suelo de la cuenca.

Posterior a obtener dichos datos se determinarán características climatológicas relacionadas a la precipitación de la región.

- Determinación del régimen diaria, mensual y anual de lluvia promedio sobre la cuenca del río Cahabón.
- Análisis de la variabilidad de la lluvia anual comparándola con los valores medio anuales de la cuenca.
- Una vez se tengan todos los datos y se haya generado el hidrograma unitario estos datos fueron ingresados a el programa HEC-HMS.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

En esta sección de la tesis se buscó compilar y organizar la información obtenida de cálculos propios para satisfacer las premisas propuestas en los objetivos.

Tabla XVI. **Morfometría de la cuenca**

Característica Morfológicas	Valor
Área (km ²)	778,9228
Altura máxima (m)	2 643,0000
Altura mínima (m)	1 045,0000
Longitud cauce principal (m)	82 388,6000
Pendiente media	0,0204
Densidad de drenaje	0,2107
Coefficiente de compacidad o relación circular	2,8763
Factor de forma o relación de forma	0,1148

Fuente: elaboración propia, con base en las secciones 2.8. y 2.9. de este trabajo de graduación.

Tabla XVII. **Curva Número Pondera de la cuenca del río Cahabón**

Año	CN I	CN II	CN III
1999	51,17	68,13	80,75
2005	51,16	68,31	81,08
2010	52,23	69,41	82,06
2015	53,82	70,86	83,20
2018	56,96	73,56	85,07

Fuente: elaboración propia, con base en la sección 2.14.4. de este trabajo de graduación.

Tabla XVIII. **Precipitación mensual del período de estudio en la cuenca**

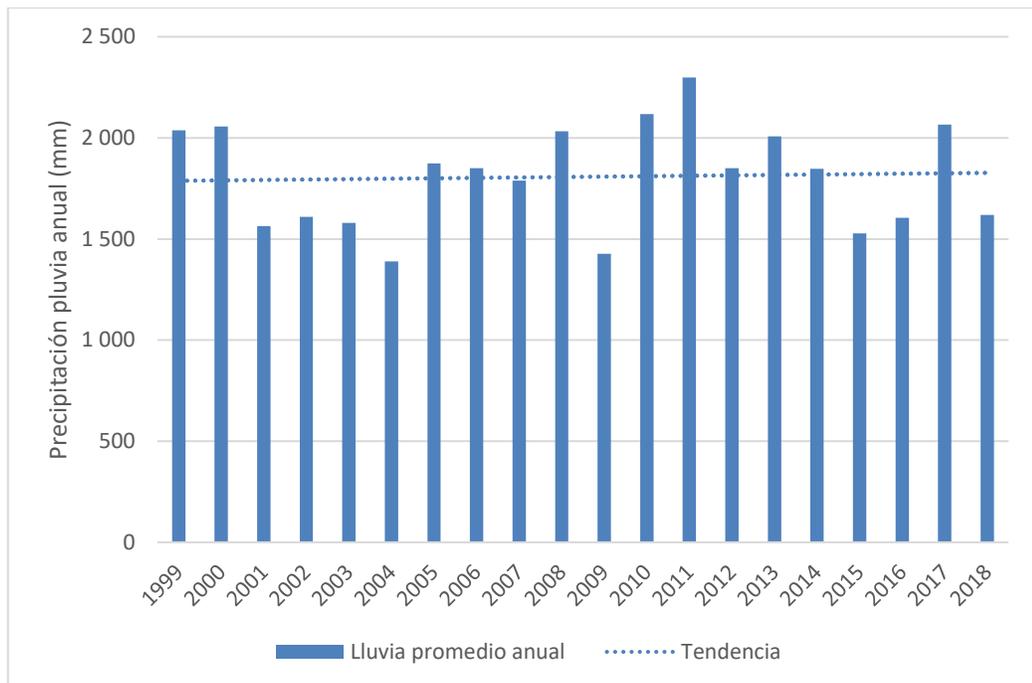
mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
1999	74,6	74,3	68,9	90,2	69,1	307,7	309,4	180,7	436,0	256,8	104,0	65,6
2000	86,1	43,5	29,0	40,0	369,2	311,7	187,4	292,7	323,3	217,0	86,7	69,1
2001	51,9	56,7	70,0	35,0	150,0	157,5	216,9	187,8	301,5	173,8	66,8	95,0
2002	50,6	64,5	47,9	31,4	137,1	246,7	252,8	169,9	298,7	168,8	91,6	58,1
2003	66,8	43,8	116,1	30,6	114,4	232,7	219,7	145,4	200,5	137,8	221,7	49,6
2004	59,8	31,5	31,4	102,6	140,9	223,4	207,7	125,5	184,9	146,2	97,4	38,5
2005	59,3	27,6	157,0	59,4	103,3	332,1	303,1	322,7	255,7	143,8	55,9	53,8
2006	168,2	64,8	54,5	83,8	226,7	321,8	238,4	176,7	180,5	185,6	89,9	59,8
2007	81,8	30,0	69,4	50,5	64,2	299,3	202,1	333,0	254,9	268,6	106,7	28,4
2008	78,6	49,0	62,3	65,3	159,8	227,2	491,7	266,8	313,7	241,2	36,1	41,0
2009	75,1	45,4	28,7	52,8	178,3	225,6	187,2	165,9	145,0	81,3	140,4	101,5
2010	42,8	35,4	25,2	145,1	291,6	227,1	382,7	406,8	361,4	72,7	76,3	50,4
2011	94,3	37,9	67,4	124,4	142,6	320,9	346,0	317,4	343,5	358,5	75,2	70,5
2012	108,5	82,0	68,6	103,3	187,0	268,9	188,8	345,9	186,9	184,0	67,8	58,3
2013	66,4	31,1	96,3	74,3	147,5	298,3	288,9	216,0	310,4	264,5	162,1	51,8
2014	58,3	30,7	46,8	62,5	239,1	358,3	138,6	196,0	274,2	294,6	107,1	41,1
2015	76,4	32,1	75,9	101,3	89,6	231,1	142,3	93,1	237,7	178,4	226,9	67,0
2016	73,5	53,2	55,4	79,7	67,6	246,1	176,0	320,0	244,1	140,6	98,5	93,1
2017	99,3	37,0	87,7	68,5	131,2	332,7	236,1	206,1	308,4	381,4	114,9	68,8
2018	145,5	49,7	40,3	106,5	182,5	253,4	155,7	134,6	183,6	179,7	95,7	70,4

Fuente: elaboración propia, datos proporcionados por estaciones meteorológicas de INSIVUMEH y estaciones privadas.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información

En esta sección se buscó dar un procesamiento ordenado a la información previamente recolectada y calculada. A continuación, se presenta dicha información en gráficas y tablas ordenadas.

Figura 25. **Serie de tiempo de precipitación anual en la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, datos proporcionados por estaciones meteorológicas de INSIVUMEH y estaciones privadas.

De la figura anterior, se evidencia al observar el año hidrológico 2009 – 2010, han sido uno de los más deficitarios seguido del año hidrológico 2010 – 2011, como el más húmedo registrado hasta el momento. Además, se muestra un fuerte déficit evidente de precipitación en los años 2015 y 2016 lo

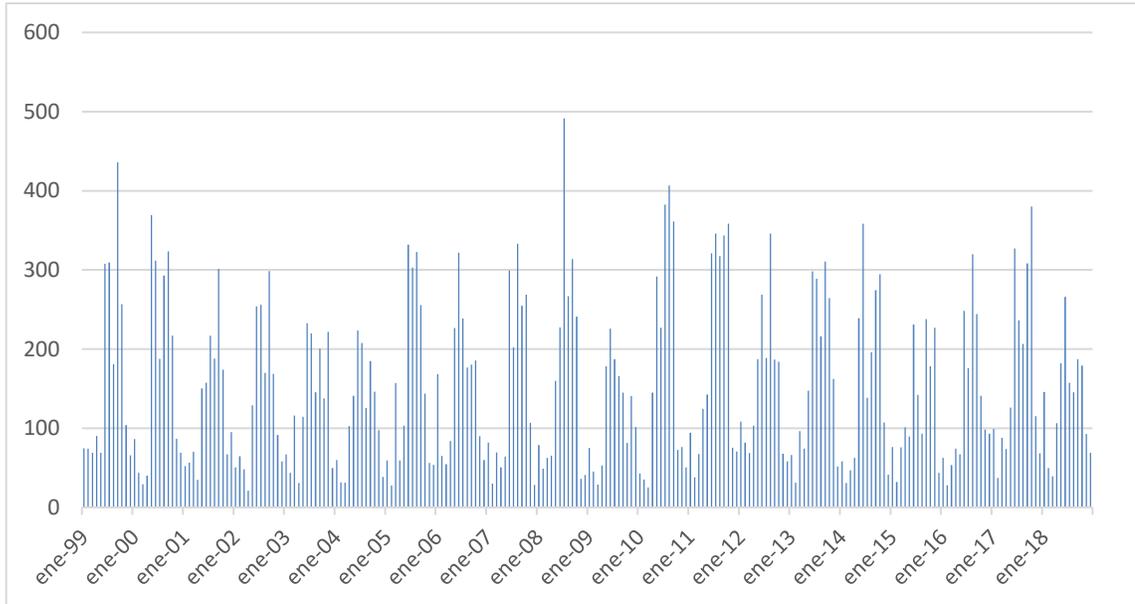
cual, eventualmente, es uno de los factores que impacta en los caudales analizados y modelados en la presente tesis.

Tabla XIX. **Parámetros estadísticos de la precipitación anual**

Estación	Precipitación media anual	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo
Chajcar	1 946,63	320,99	0,16	0,05
Chamelco	1 833,94	273,87	0,15	0,11
Chamil	2 046,38	292,63	0,14	-0,01
Coban	1 742,09	280,28	0,16	0,56
Embalse	2 447,13	394,28	0,16	-0,08
Las Pacayas	1 542,42	226,26	0,15	-0,04
Popabaj	1 800,61	315,34	0,18	0,51
Purulha	1 400,74	254,16	0,18	0,36
Samac	2 036,84	340,16	0,17	-0,39
Santa Cruz	1 635,53	239,18	0,15	0,04
Tactic	1 525,58	230,82	0,15	0,20
Tamahu	1 753,75	261,42	0,15	0,14
Xucaneb	1 764,99	291,62	0,17	0,61
Yuxilha	1 645,44	310,94	0,19	0,99

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por estaciones meteorológicas de INSIVUMEH y estaciones privadas.

Figura 26. Serie de tiempo de precipitación mensual de la cuenca del río Cahabón



Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por estaciones meteorológicas de INSIVUMEH y estaciones privadas.

Tabla XX. Parámetros estadísticos de la precipitación mensual por estación

Estación	Precipitación media mensual	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo
Chajcar	162,22	127,26	0,78	0,92
Chamelco	152,83	94,93	0,62	0,80
Chamil	170,53	120,37	0,71	0,91
Coban	145,17	97,21	0,67	0,83
Embalse	203,93	145,98	0,72	0,93
Las Pacayas	128,54	93,59	0,73	0,72
Popabaj	150,05	122,82	0,82	1,08
Purulha	116,73	105,57	0,90	0,83
Samac	169,74	108,24	0,64	0,81

Continuación de la tabla XX.

Estación	Precipitación media mensual	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo
Santa Cruz	136,29	94,39	0,69	0,80
Tactic	127,13	91,59	0,72	0,76
Tamahu	146,15	120,14	0,82	0,83
Xucaneb	147,08	102,14	0,69	0,89
Yuxilha	137,12	103,64	0,76	0,82

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por estaciones meteorológicas de INSIVUMEH y estaciones privadas.

Al analizar las gráficas y parámetros estadísticos anteriores es notorio un leve aumento en el sesgo en valores positivos, lo que indica presencia de valores altos o extremos. Además, el coeficiente de variación aumenta significativamente, en comparación con la serie anual. Esto se debe a que existen valores de lámina acumulada mensual de lluvias iguales o muy cercanos a cero en los meses de estiaje de cada año.

Tabla XXI. **Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe para los modelos lluvia-esorrentía**

	1999	2005	2010	2015	2018
Coefficiente Nash-Sutcliffe	0,65	0,67	0,69	0,71	0,66
Categoría del ajuste	Muy Bueno				

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Dentro del análisis estadístico se realizó:

- Cálculo de los parámetros estadísticos de la serie de precipitación mensual y anual de las catorce estaciones hidrológicas analizadas. Estos parámetros son: media, desviación estándar, coeficiente de variación y sesgo.
- Determinación de la homogeneidad de los datos de caudal generado con respecto de los observados:
 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe

3.9. Plan de análisis de los resultados

En esta sección se buscó definir los pasos a seguir para lograr alcanzar los resultados propuestos en los objetivos. A continuación, se desarrolla ampliamente el plan de análisis de los resultados.

3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Los modelos aplicables al análisis hidrológico del presente trabajo tienen como propósito la transformación de lluvia-escorrentía para la predicción y protección ante avenidas debido a eventos de precipitación extremos. Estos modelos son beneficiosos durante la etapa de diseño, operación y gestión de estructuras hidráulicas ya que pueden permitir la prevención de daños por inundaciones, así como la selección de terrenos adecuados para dichas edificaciones.

3.9.2. Programas a utilizar para análisis de datos

- Hydrologic Modeling System HEC-HMS: según el *hydrologic Engineering Center* este programa fue diseñado para simular los procesos hidrológicos del sistema de una cuenca, subcuenca o microcuenca. El software incluye análisis hidrológico tradicional, así como procesos necesarios para una simulación continua incluyendo procesos de evapotranspiración, deshielo y valores de humedad del suelo.
- *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)*: esta es una base de datos de más de 30 años de registros, que cubren la desde la latitud 50°S a 50°N y todas las longitudes. Los datos están disponibles desde el año 1981 hasta el presente cercano. Estos datos son obtenidos a partir de tecnología de infrarrojos por parte del Grupo de Riesgos Climáticos.
- Qgis: Esta categorizado como un sistema de información geográfico “amigable” con el usuario, bajo la licencia de GNU. QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) que corre en Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android. Tiene la facilidad de trabajar con numerosas funciones y formatos de vectores raster y bases de datos.

3.10. Modelo de la cuenca para HEC-HMS

El Software HEC-HMS requiere de diferentes parámetros para especificar la metodología a utilizar en el diseño del modelo hidrológico. Cada parámetro se especifica dentro del manual de uso que posee el programa. Apoyada en la teoría que provee el manual de uso del usuario, se utilizaron los siguientes parámetros:

3.10.1. Canopy: Simple Canopy

El *canopy* o dosel arbóreo es uno de los componentes que se pueden incluir en el elemento de la subcuenca y representa la presencia de plantas en el paisaje. Las plantas interceptan la precipitación, reduciendo la cantidad que llega al suelo. Además, las plantas también extraen agua del suelo en un proceso llamado transpiración.

El método de simple canopy es una representación simple del área que las copas de plantas superficiales forman sobre el terreno. Toda precipitación es interceptada sobre esta superficie, hasta que se llena la capacidad de almacenamiento y la precipitación adicional cae a la superficie. Los componentes del parámetro Canopy serán calibrados por lo que se tomó valores constantes para todas las subcuencas:

- Almacenamiento inicial: es la condición inicial del dosel que debe especificarse como el porcentaje del almacenamiento lleno de agua al comienzo de la simulación.
- Almacenamiento máximo: representa la cantidad máxima de agua que se puede retener en las hojas antes de que comience la caída a la superficie, este valor se especifica como una profundidad efectiva de agua calculada con la ecuación 5, asumiendo el 5 % de almacenamiento inicial y un valor de precipitación mensual de 894,87 mm según la tabla XVII.

3.10.2. Superficies: superficie simple

Ante las precipitaciones la superficie del suelo tiene la capacidad de almacenar superficialmente agua. Como consecuencia la escorrentía superficial se generará cuando la capacidad de almacenamiento se llena y la tasa de

precipitación a través de la caída excede la tasa de infiltración. Ambos factores del modelo serán calibrados por lo que se tomó valores constantes para todas las subcuencas. Dichos factores son:

- Condición inicial de la superficie: La condición inicial de la superficie está dada por un valor en porcentaje que representa la fracción del almacenamiento de la superficie que está lleno de agua al comienzo de la simulación.
- Almacenamiento máximo: representa la cantidad máxima de agua que se puede retener en la superficie del suelo antes de que comience la esorrentía superficial.

3.10.3. Pérdida: curva número SCS

Esta sección del modelo de la cuenca requiere el ingreso de la información de la curva número en condiciones normales (CN II) y el porcentaje de impermeabilidad.

Para generar la curva número ponderada de cada subcuenca se hizo uso de la herramienta de unión de polígonos en Qgis. De modo que se relacionan las características de los *shapes* de uso de suelo, subcuencas y serie de suelo.

Los datos obtenidos de la operación vectorial de unión de los *shapes* mencionados, se categorizan según los parámetros de la tabla VI. Una vez asignado el valor de Curva número en función del grupo hidrológico y uso del suelo, para condiciones normales, se organizó la información en la siguiente tabla.

Tabla XXII. **Curva Número ponderada de las subcuencas de la cuenca del río Cahabón, en condiciones normales**

CN	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabon 1	55,8	84,9	88,4	87,5	83,79
Cahabon 2	53,8	62,2	76,4	77,6	76,8
Cahabon 3	35,3	75,6	67,7	76,5	80,1
Cahabon 4	46,7	57,5	57,0	71,0	76,9
Cahabon 5	39,8	48,8	52,9	69,7	77,9
Cahabon 6	37,2	35,6	38,8	55,7	63,3
Cahabon 7	47,0	36,0	46,7	55,8	66,6
Laguna chichoj	50,9	36,9	49,2	65,2	78,7
Matanzas	50,6	38,8	56,0	61,2	79,2
Río Chicoy	38,9	36,9	57,3	59,9	75,8
Río Nestela	50,3	35,5	50,3	58,1	68,1
Río Tzunutz	46,1	39,4	52,6	55,5	63,9
CN ponderada	45,2	48,1	55,8	66,1	75,1

Fuente: elaboración propia.

En el caso del Porcentaje de área impermeabilizada se realizó una suma de áreas que representa las regiones de la cuenca bajo los usos de suelo de cultivos e infraestructura. Este porcentaje de área se ha calculado a partir de las imágenes satelitales e información obtenida con QGIS en la sección 2.14.1 y 2.14.2 de este trabajo de graduación.

Tabla XXIII. **Porcentaje de área impermeabilizada por subcuenca**

Subcuenca	Porcentaje de Área				
	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabón 1	28,34	54,69	48,66	65,24	82,99
Cahabón 2	54,81	49,52	49,54	39,70	50,75
Cahabón 3	67,83	70,33	61,51	57,29	74,34
Cahabón 4	29,71	21,15	30,41	38,58	52,05
Cahabón 5	46,64	42,65	52,39	60,99	66,67
Cahabón 6	60,38	45,35	36,98	41,60	46,07
Cahabón 7	45,57	49,14	36,63	39,84	33,36
Río Chicoy	35,69	34,10	32,20	44,60	63,92
Laguna Chichoj	55,78	61,64	65,45	70,41	73,55

Continuación de la tabla XXIII.

Subcuenca	Porcentaje de Área				
	1999	2005	2010	2015	2018
Río Matanzas	58,46	40,12	35,11	28,74	45,75
Río Mestelá	44,37	36,59	32,98	59,78	63,71
Río Tzunutz	26,15	28,27	28,86	43,58	60,39

Fuente: elaboración propia, a partir de las figuras 13-15 y 19-20.

Además, esta sección requiere de la información de la abstracción inicial. Este dato puede obtenerse aplicando la siguiente ecuación:

$$I_a = 0.2 S$$

(Ec. 20)

Donde:

I_a: abstracción inicial (mm)

S: capacidad de almacenamiento

Tabla XXIV. **Abstracción inicial de las subcuencas del río Cahabón**

Subcuenca	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabón 1	18,48	13,45	12,96	10,30	9,83
Cahabón 2	15,22	15,68	14,49	15,37	15,31
Cahabón 3	41,56	12,64	13,70	13,71	12,62
Cahabón 4	12,89	20,26	18,06	16,97	15,22
Cahabón 5	17,17	20,58	16,60	15,56	14,39
Cahabón 6	20,74	33,41	31,42	28,40	29,49
Cahabón 7	28,34	22,74	25,26	24,79	25,49
Laguna Chichoj	16,31	15,89	14,55	14,40	13,76
Río Chicoy	22,40	22,03	20,73	20,07	16,22
Río Matanzas	11,00	12,69	13,64	15,25	13,38
Río Nestelá	38,48	38,37	36,50	26,67	23,83
Río Tzunutz	52,24	49,56	38,86	35,03	28,70

Fuente: elaboración propia.

3.10.4. Método de transformación: *Clark Unit Hydrograph*

Para dicha sección se solicita ingresar el dato del coeficiente de almacenamiento en horas, dato teórico con valor de 1,8 horas. Además, el Tiempo de Concentración en la dimensional hora, calculo que se realizó con la ecuación 17 y los datos de la tabla XXV.

Tabla XXV. **Tiempo de Concentración en horas**

Subcuenca	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabón 1	1,80	2,03	2,07	2,25	2,28
Cahabón 2	1,79	1,75	1,82	1,78	1,79
Cahabón 3	8,28	14,18	13,72	13,73	14,15
Cahabón 4	3,45	2,85	3,02	3,08	3,21
Cahabón 5	5,22	4,62	5,17	5,29	5,51
Cahabón 6	3,07	2,38	2,50	2,63	2,58
Cahabón 7	2,23	2,60	2,46	2,50	2,48
Laguna Chichoj	3,12	3,14	3,27	3,28	3,35
Matanzas	0,35	0,33	0,32	0,31	0,33
Río Chicoy	1,08	1,09	1,13	1,14	1,25
Río Nestelá	1,58	1,62	1,69	2,00	2,13
Río Tzunutz	0,92	0,95	1,12	1,18	1,31

Fuente: elaboración propia, con base a la ecuación 17.

3.10.5. Enrutamiento: tiempo de retardo (*Lag*)

A continuación, se presentan las tablas que contienen los resultados del cálculo del tiempo de retardo, el cual es una de las variables a ingresar en el programa HEC-HMS.

Tabla XXVI. **Tiempo de retardo en minutos**

Subcuenca	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabón 1	64,65	73,10	74,52	80,97	82,23
Cahabón 2	64,34	63,16	65,53	64,16	64,28
Cahabón 3	298,18	510,38	494,09	494,18	509,36
Cahabón 4	124,33	102,62	108,72	110,72	115,58
Cahabón 5	187,78	166,32	186,25	190,43	198,21
Cahabón 6	110,61	85,66	90,11	94,60	92,98
Cahabón 7	80,23	93,52	88,72	90,16	89,34
Río Matanzas	12,63	12,01	11,70	11,18	11,76

Fuente: elaboración propia, con base a los datos de la tabla XXV y la ecuación 18.

3.10.6. Base Flow: Constante mensual

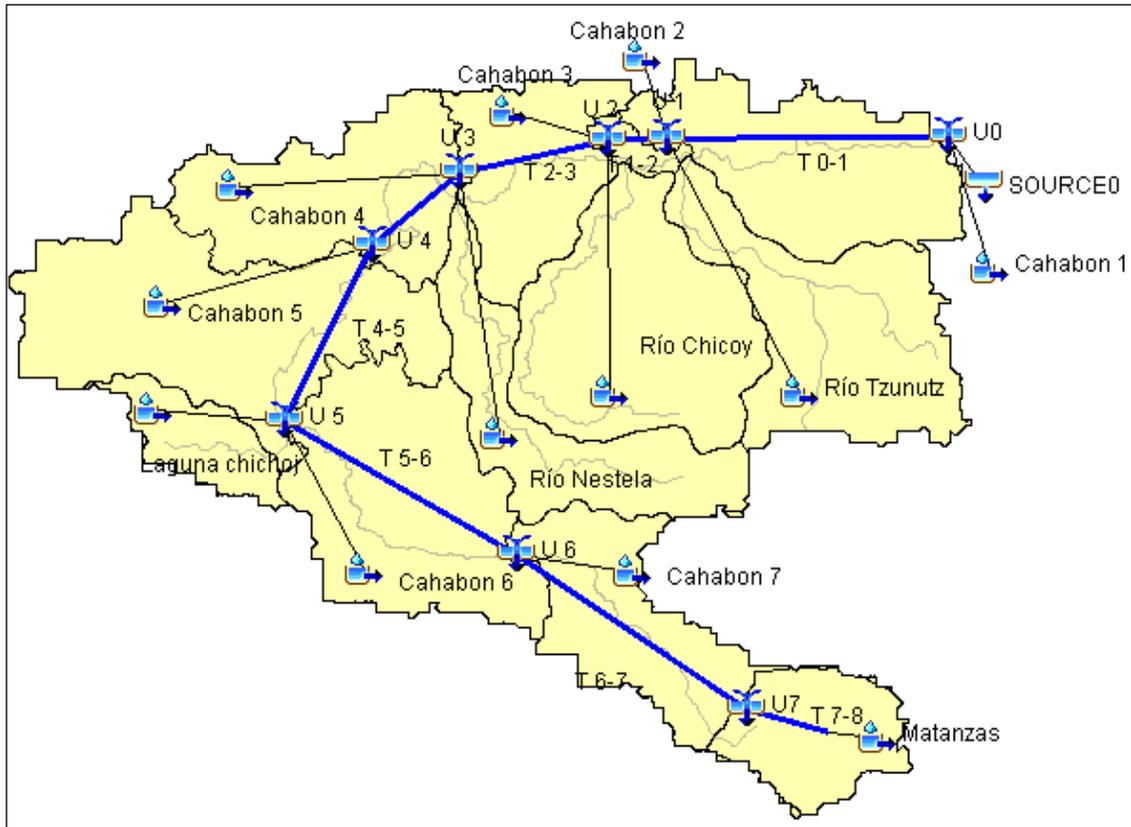
A partir de un registro histórico de caudales de la cuenca Cahabón se determinó el caudal base mensual calculando el percentil diez de cada mes.

Tabla XXVII. **Caudal base mensual histórico**

Subcuenca	Mes											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Cahabón 1	1,04	0,95	0,69	0,54	0,52	0,79	1,08	0,99	1,21	1,50	1,40	1,01
Cahabón 2	0,08	0,08	0,06	0,04	0,04	0,06	0,09	0,08	0,10	0,12	0,11	0,08
Cahabón 3	0,70	0,65	0,47	0,37	0,35	0,53	0,73	0,67	0,82	1,02	0,95	0,68
Cahabón 4	0,95	0,87	0,63	0,49	0,48	0,72	0,99	0,91	1,11	1,38	1,28	0,92
Cahabón 5	1,59	1,46	1,06	0,82	0,80	1,20	1,65	1,51	1,85	2,30	2,14	1,54
Cahabón 6	1,29	1,18	0,86	0,67	0,65	0,98	1,34	1,23	1,50	1,86	1,74	1,25
Cahabón 7	0,79	0,73	0,53	0,41	0,40	0,60	0,83	0,75	0,92	1,15	1,07	0,77
Laguna Chichoj	1,31	1,21	0,88	0,68	0,66	1,00	1,37	1,25	1,53	1,90	1,77	1,27
Matanzas	1,13	1,04	0,76	0,59	0,57	0,86	1,18	1,08	1,32	1,64	1,53	1,10
Río Chicoy	0,82	0,75	0,54	0,42	0,41	0,62	0,85	0,78	0,95	1,18	1,10	0,79
Río Nestalá	0,51	0,47	0,34	0,27	0,26	0,39	0,54	0,49	0,60	0,75	0,70	0,50
Río Tzunutz	0,31	0,28	0,21	0,16	0,15	0,23	0,32	0,29	0,36	0,45	0,42	0,30
Caudal Base Total	10,52	9,67	7,02	5,47	5,29	7,99	10,97	10,03	12,27	15,24	14,21	10,22

Fuente: elaboración propia, con datos históricos proporcionados por Aguaconsulta.

Figura 27. **Modelo de la cuenca**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4.

3.11. **Modelo meteorológico para HEC-HMS**

Al definir el modelo meteorológico se debe delimitar las variables climáticas a estudiar, en este caso se utilizaron datos de precipitación y evapotranspiración. Estos parámetros se asignaron a las diversas subcuencas que componen la cuenca del río Cahabón.

3.11.1. Precipitación

En esta sección se ingresó la información de precipitación media diaria de cada subcuenca. Dicha información se presenta una tabla con la precipitación acumulada mensual de cada subcuenca analizada dentro del modelo HEC-HMS, en el anexo 1.

3.11.2. Evapotranspiración Potencial

Para la determinación de la Evapotranspiración Potencial se utilizó la metodología planteada por Hargreaves-Samani, dada por la ecuación 1 de esta tesis.

Tabla XXVIII. **Radiación extraterrestre equivalente a lámina de agua (mm/día) para el hemisferio norte, aplicable a la cuenca de Cahabón**

Mes	Re (mm/día)
enero	12,108
febrero	13,381
marzo	14,754
abril	15,627
mayo	15,946
junio	15,846
julio	53,997
agosto	15,7
septiembre	15,027
octubre	13,954
noviembre	12,508
diciembre	11,708

Fuente: elaboración propia, con base a la ecuación 1.

3.12. Calibración del modelo

A través de la optimización de parámetros que definen el comportamiento de la cuenca del río Chabón se buscó calibrar el modelo hidrológico al aproximar el flujo simulado al flujo observado. Como plantea Juan Cabrera en su artículo Calibración de Modelos Hidrológicos, aunque no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología, estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración.

En la presente tesis se utilizó la opción de un modelo determinístico, es decir que no considera términos aleatorios dentro del modelo. Además, la calidad de la calibración de los modelos se cuantificó con el criterio de Nash-Stucliffe. Con cada corrida de optimización se buscó alcanzar un coeficiente de Nash-Sutcliffe mayor a 0,65. Este parámetro se obtiene de la ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sin,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

E: criterio de Nash-Sutcliffe

Q: caudal (m³/s)

\bar{Q} : caudal medio

Según Juan Cabrera los valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos como:

Tabla XXIX. **Valores referenciales del criterio Nash-Sutcliffe**

E	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2- 0,4	Satisfactorio
0,4- 0,65	Bueno
0,65 - 0,8	Muy Bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: LÓPEZ, Eduardo. *Análisis de la aplicación del modelo hidrológico “SMAP” en la cuenca del Río San Antonio*. <https://cutt.ly/FmiiuMF>. Consulta: 30 de mayo de 2020.

Con cada corrida de optimización está compuesta por un modelo de cuenca, modelo meteorológico e información de control de tiempo. Además, se debe seleccionar una función objetivo, que en este caso fue la maximización del valor del Nash-Sutcliffe y los parámetros que se ajustarán para encontrar un modelo óptimo, los cuales se presenta en la sección 3.10 de la presente tesis. Cada parámetro para analizar requiere de restricciones de valores máximos y mínimos donde puede variar la optimización de modo que se garantiza el uso de parámetros razonables y lógicos. Los procesos iterativos de ajustes de cada factor a optimizar se repiten hasta que el valor de la función objetivo es satisfecho, o hasta que el número máximo de iteraciones es alcanzado.

El modelo HEC-HMS requiere de valores observados reales para generar la calibración. En este caso se contaba con valores de caudal reales diarios desde el año 2016 al 2018. A continuación, se presentan los valores calibrados para cada año analizado.

Tabla XXX. **Parámetros calibrados**

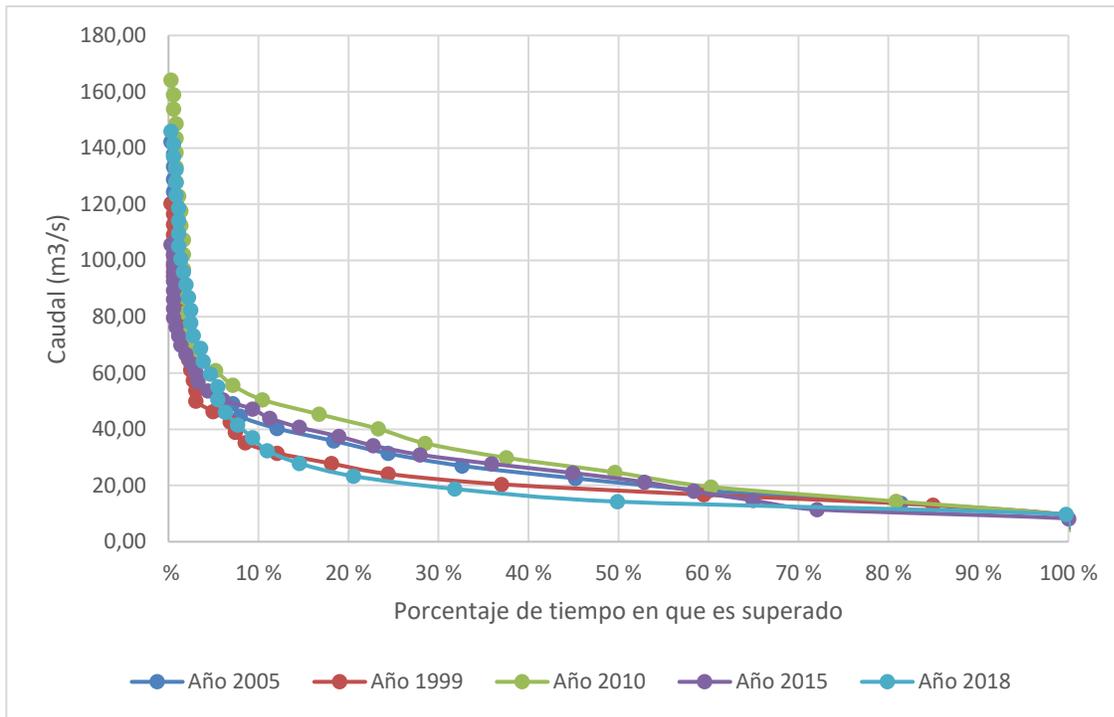
	Datos simulados con los parámetros del modelo de la cuenca HEC-HMS correspondientes al año				
	1999	2005	2010	2015	2018
Corrida en que se alcanzó la calibración	corrida 5	Corrida 5	Corrida 5	Corrida 5	corrida 5
Caudal Pico (m³/s)	321,3	315,5	291,7	299,5	378,5
Fecha caudal pico	17/10/2008	17/10/2008	17/10/2008	17/10/2008	17/10/2008
Volumen (mm)	13647,69	14175,56	13375,26	14491,28	14376,31
Coficiente Nash-Sutcliffe	0,65	0,67	0,69	0,71	0,66
Categoría del ajuste	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno

Fuente: elaboración propia, empleando Hec-HMS.

3.13. **Generación de la curva de duración de caudales**

Según la teoría planteada en la sección 2.4.2 se generaron las curvas de duración de caudales para los años 1999, 2005, 2010, 2015 y 2018 con el propósito de obtener el caudal de estiaje. El caudal de aguas bajas o estiaje se consideró como el rebasado 275 días de los 365 días del año.

Figura 28. **Curva de duración de caudales para los años 1999, 2005, 2010, 2015 y 2018**

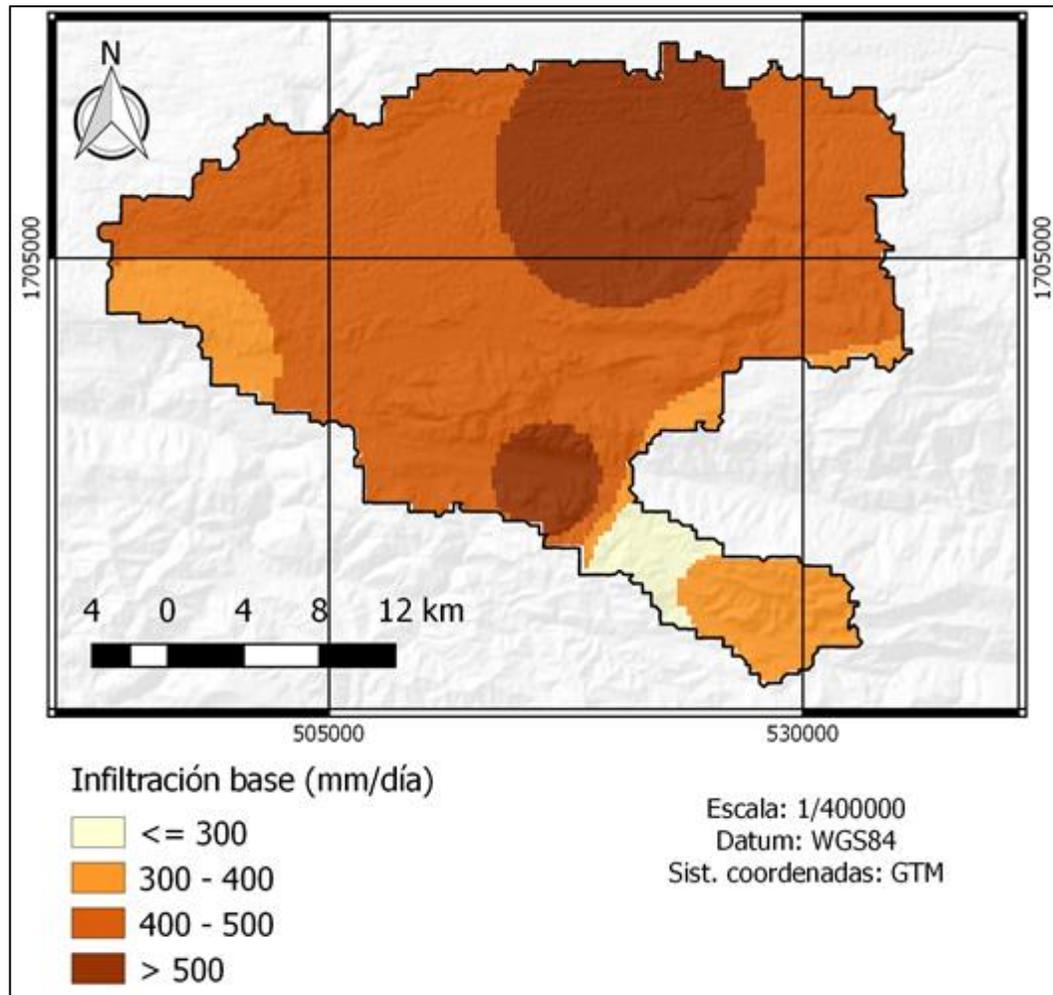


Fuente: elaboración propia.

3.14. Cálculo del balance hídrico: recarga potencial hídrica del acuífero

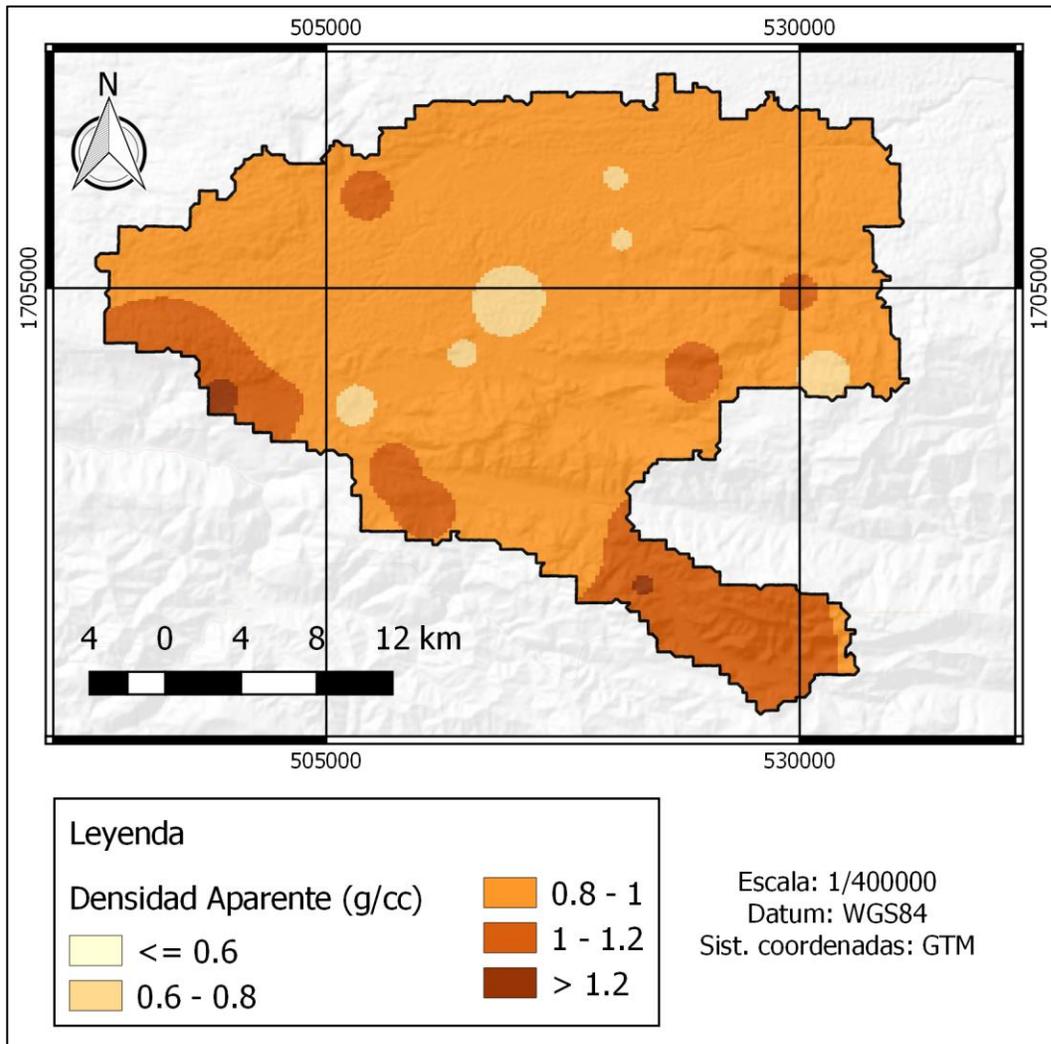
Utilizando las ecuaciones y valores de índices de la sección de la presente tesis se realizaron los cálculos necesarios para la determinación de la recarga hídrica del acuífero. A continuación, se presentan los insumos necesarios para dicho cálculo además de una tabla resumen de los valores calculados.

Figura 29. **Infiltración Base promedio del suelo la cuenca del río Cahabón**



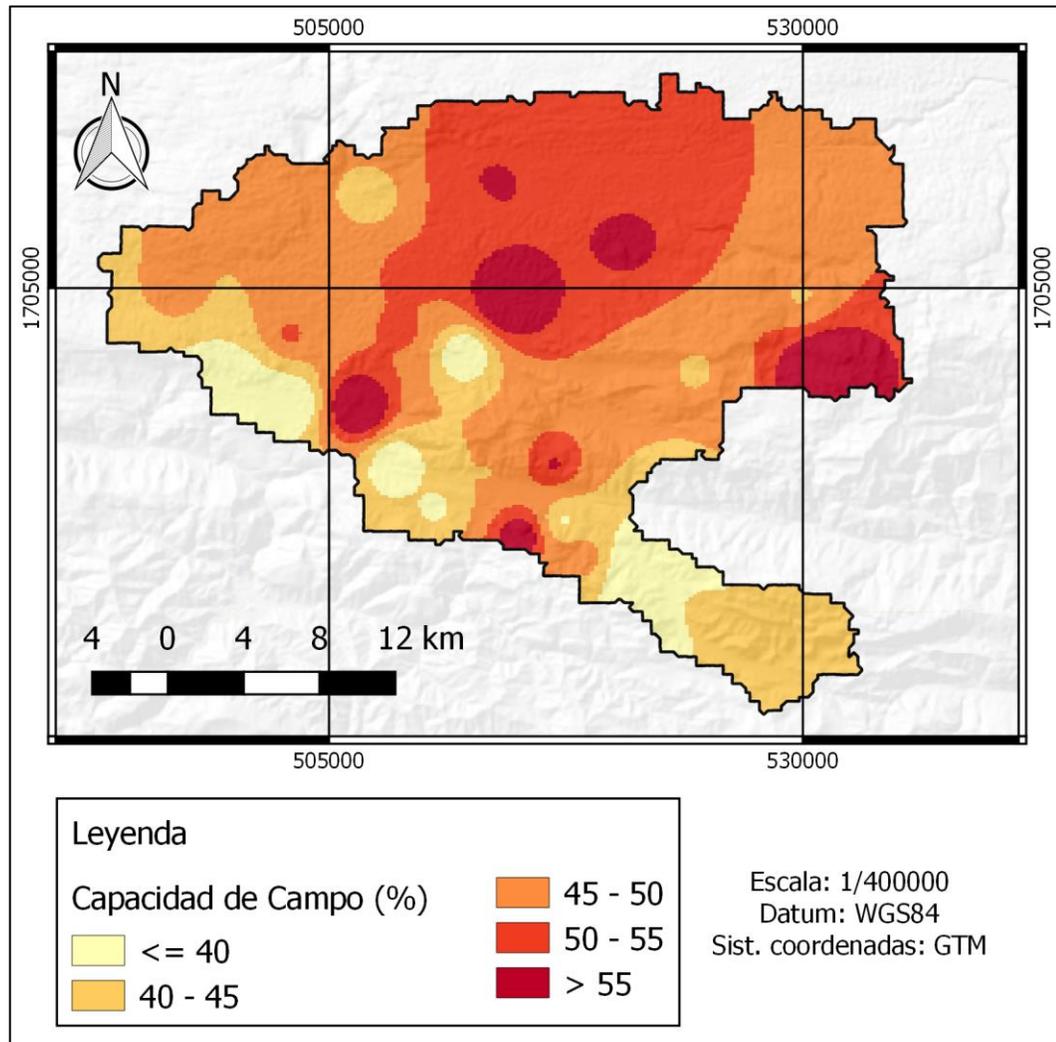
Fuente: elaboración propia, empleando AguaConsulta 2019.

Figura 30. **Densidad aparente del suelo de la cuenca del río chabón**



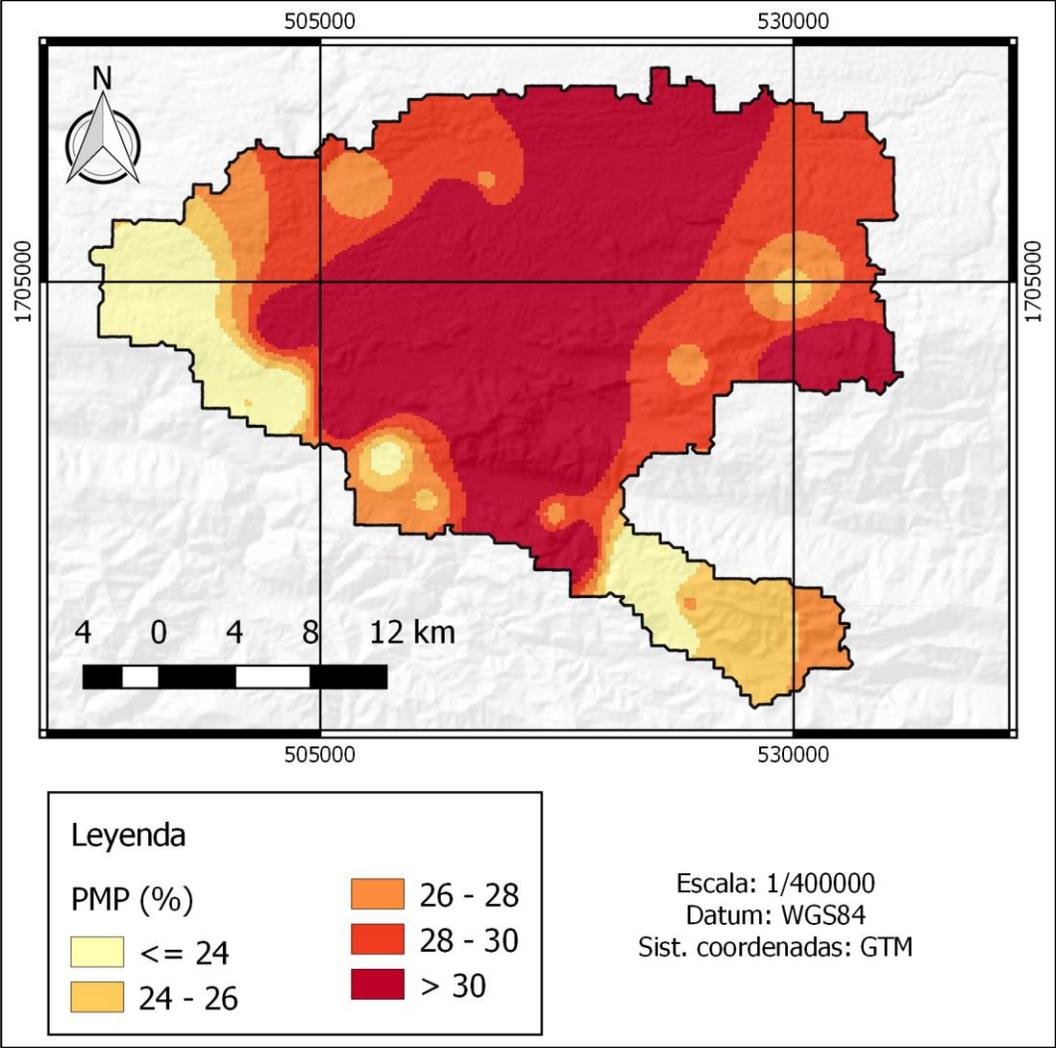
Fuente: elaboración propia, empleando AguaConsulta 2019.

Figura 31. **Capacidad de campo del suelo de la cuenca del río chabón**



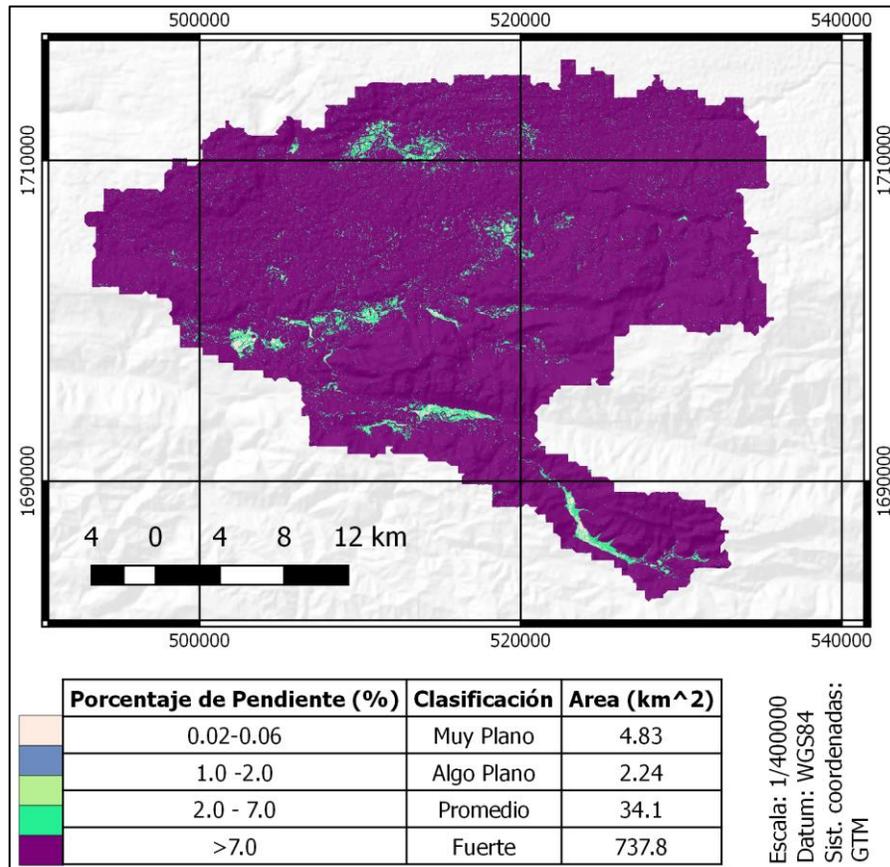
Fuente: elaboración propia, empleando AguaConsulta 2019.

Figura 32. Punto de Marchitez permanente del suelo de la cuenca del río chabón



Fuente: elaboración propia, empleando AguaConsulta 2019.

Figura 33. **Clasificación del porcentaje de pendiente**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.8.1.

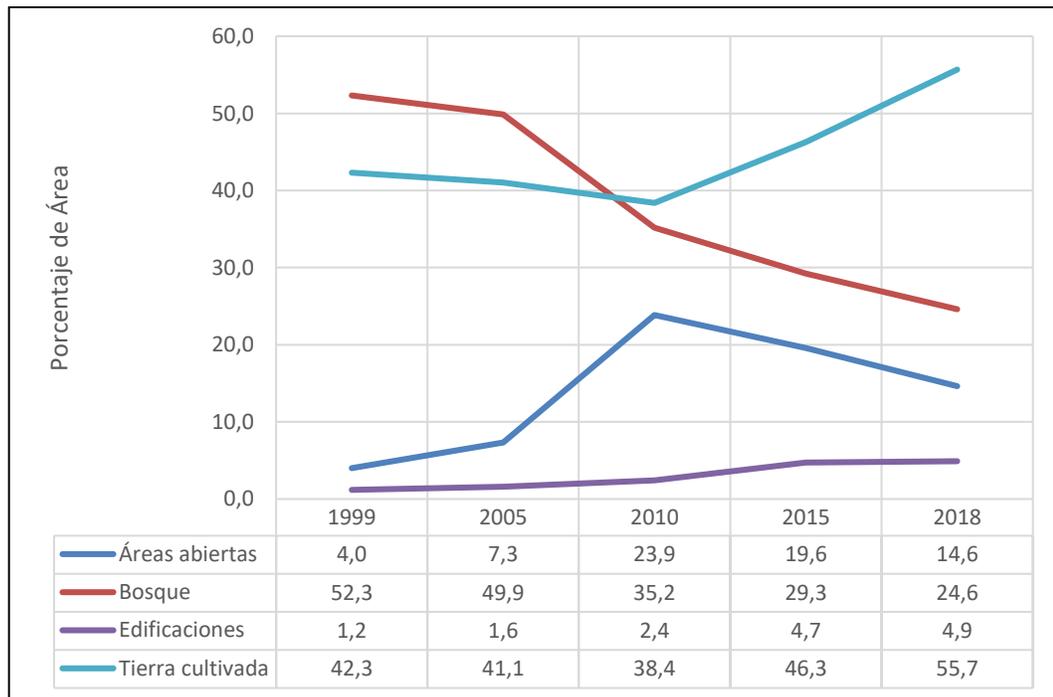
Tabla XXXI. **Balance hídrico de la recarga hídrica del acuífero**

Año	mm/año	Mm3
1999	560,4	436,51
2005	549,83	428,27
2010	545,95	425,25
2015	531,91	414,32
2018	521,83	406,46

Fuente: elaboración propia, con la metodología planteada en de la sección 2.10. del presente trabajo de graduación.

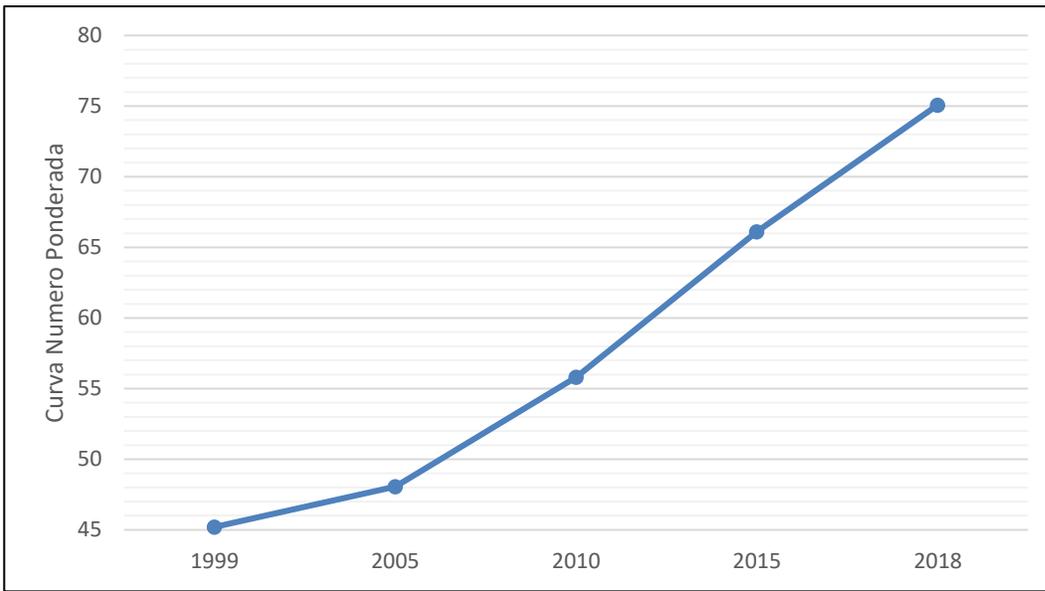
4. RESULTADOS

Figura 34. Variación del uso de suelo de la cuenca



Fuente: elaboración propia, con base en las figuras 14, 15, 16, 20 y 21.

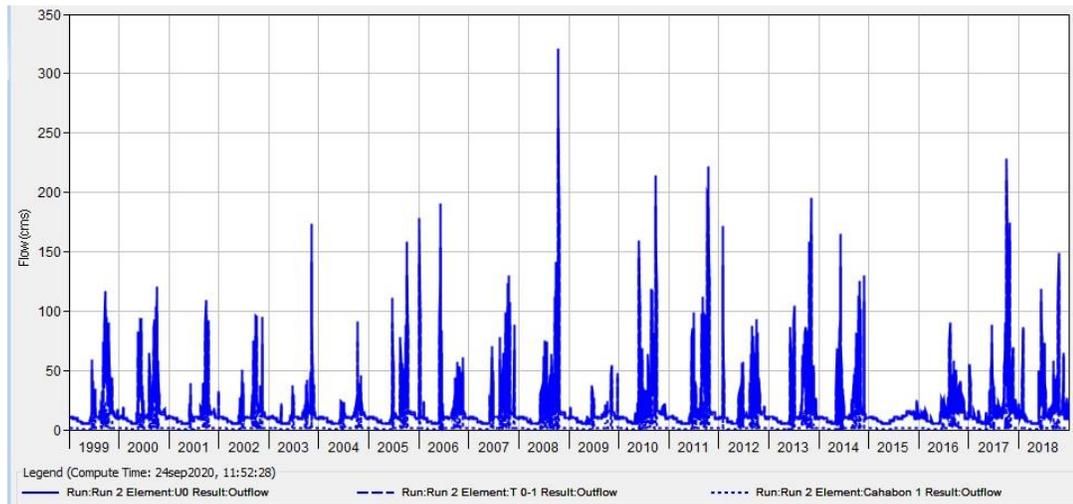
Figura 35. **Comportamiento del valor de la curva número ponderada para la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, con datos de la tabla XVII.

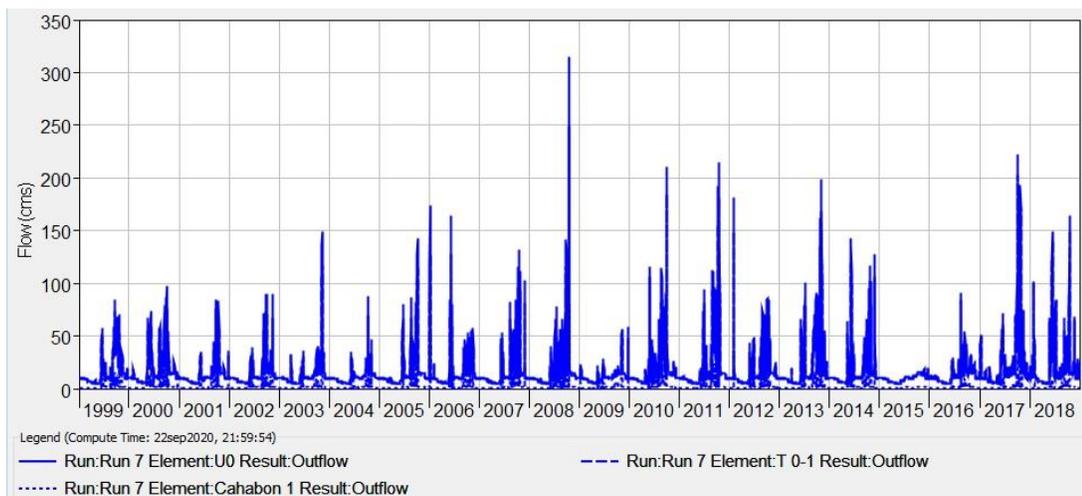
A partir de las simulaciones generadas en HEC-HMS se obtuvo cinco corridas con los diferentes parámetros calibrados para los años 1999, 2005, 2010, 2015 y 2018. Las siguientes graficas nos permiten visualizar el comportamiento del caudal bajo las condiciones meteorológicas de precipitación y evapotranspiración descritas en la sección 3.11. del presente trabajo de graduación.

Figura 36. Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 1999



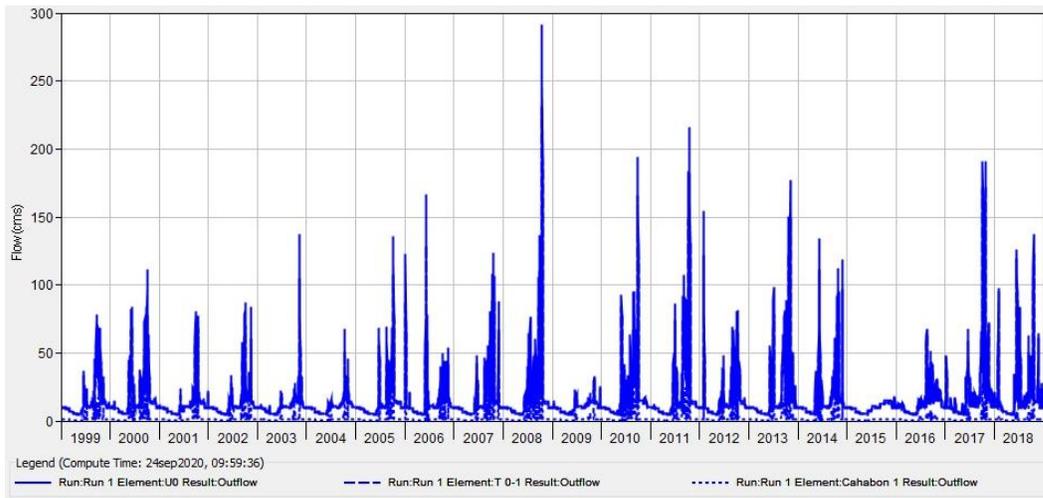
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4.

Figura 37. Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2005



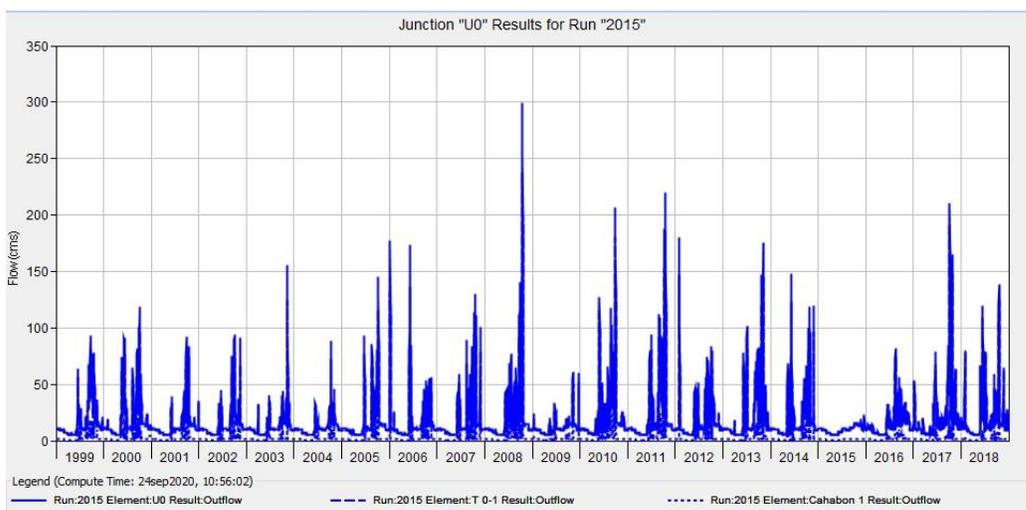
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4.

Figura 38. Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2010



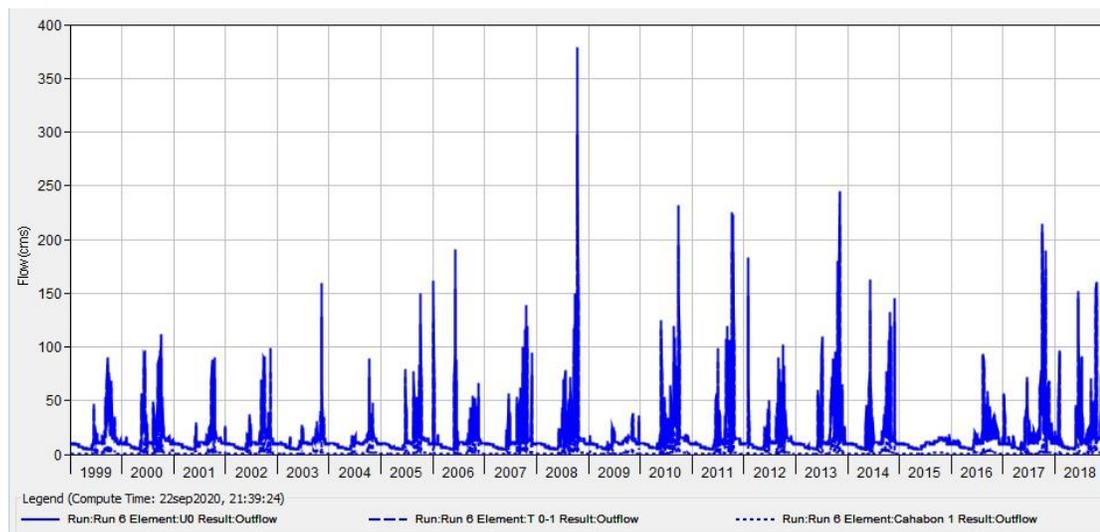
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4.

Figura 39. Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2015



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4.

Figura 40. **Simulación del caudal de 1999 hasta 2018, conforme los parámetros calibrados del año 2018**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4.

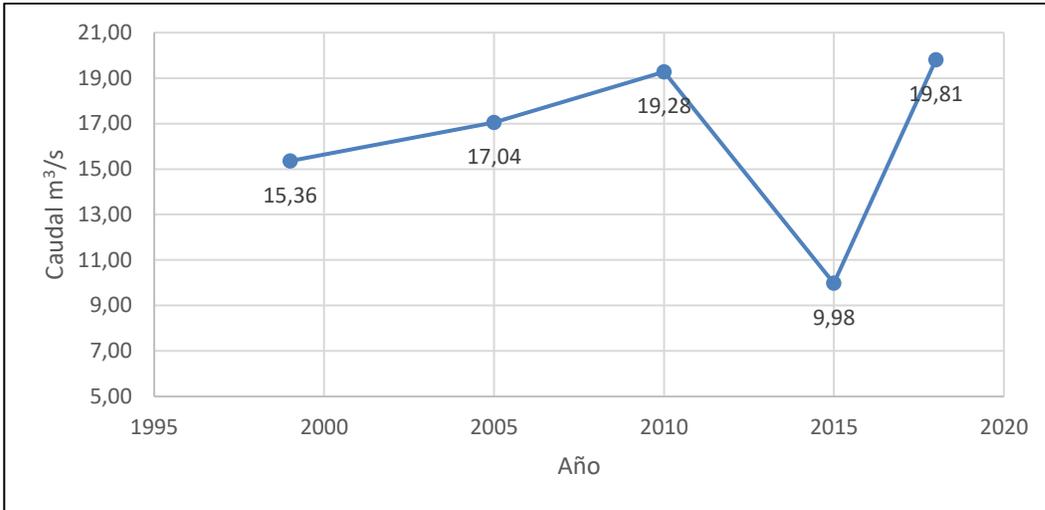
Tabla XXXII. **Resultados de la simulación de caudales pico**

Año	Fecha caudal pico	Caudal pico (m³/s)	Volumen (MM)	Curva numero
1999	17/10/2008	321,3	13 647,69	45,2
2005	17/10/2008	315,5	14 175,56	48,1
2010	17/10/2008	291,7	13 375,26	55,8
2015	17/10/2008	299,5	14 491,28	66,1
2018	17/10/2008	378,5	14 376,31	75,1

Fuente: elaboración propia, con base en las figuras 36, 37, 38, 39 y 40.

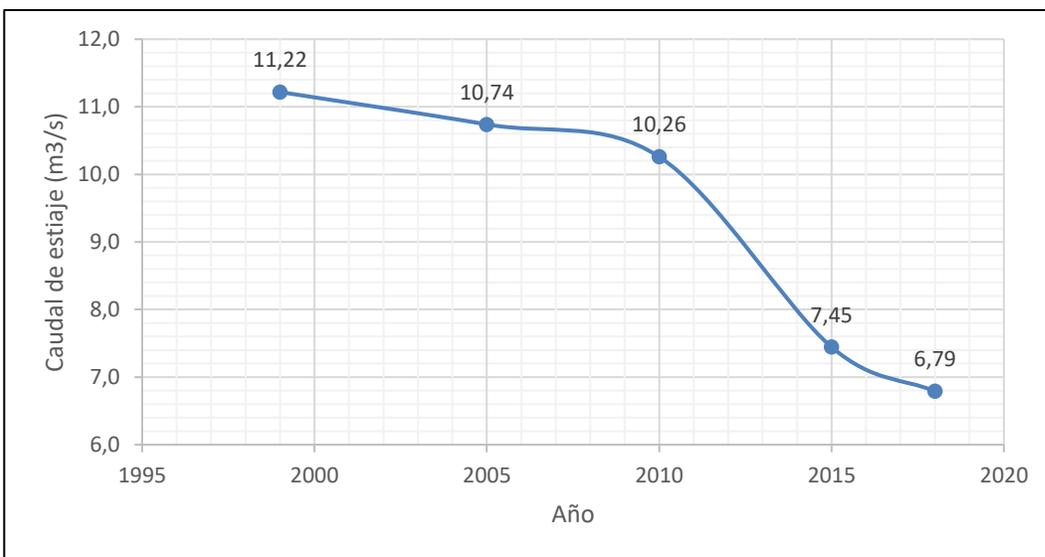
La simulación del caudal promedio anual se realizó con los parámetros calibrados respectivos al año y condiciones meteorológicas observados durante el mismo periodo anual.

Figura 41. **Caudal promedio anual**



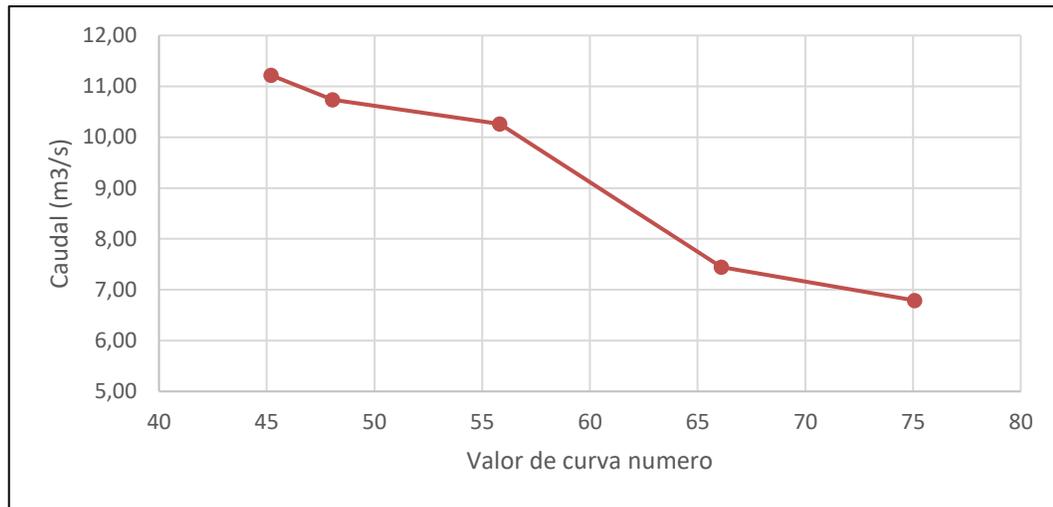
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Variación del caudal de estiaje**



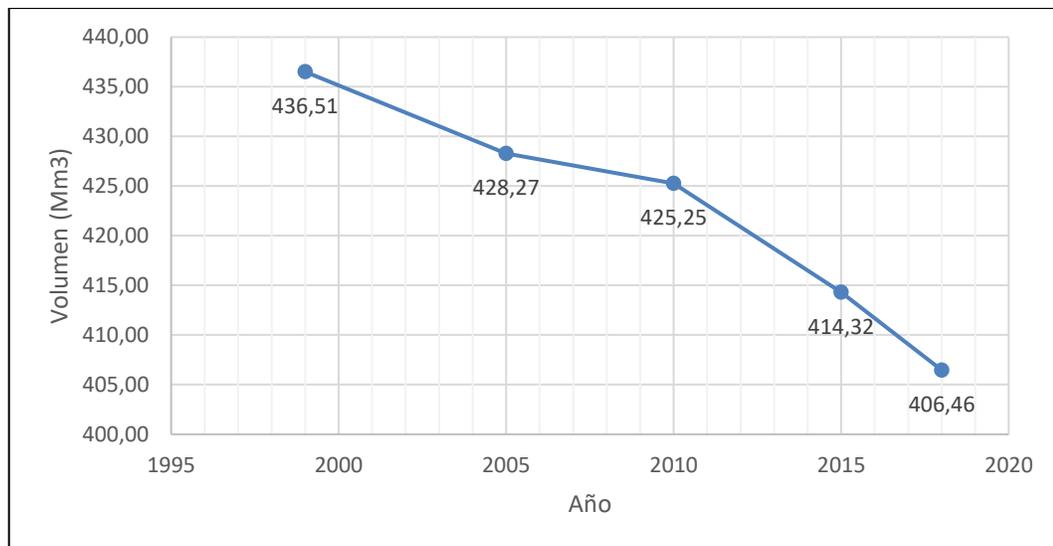
Fuente: elaboración propia, con base en la figura 28.

Figura 43. **Comparación del cambio de curva número y el caudal de estiaje para la cuenca del río Cahabón**



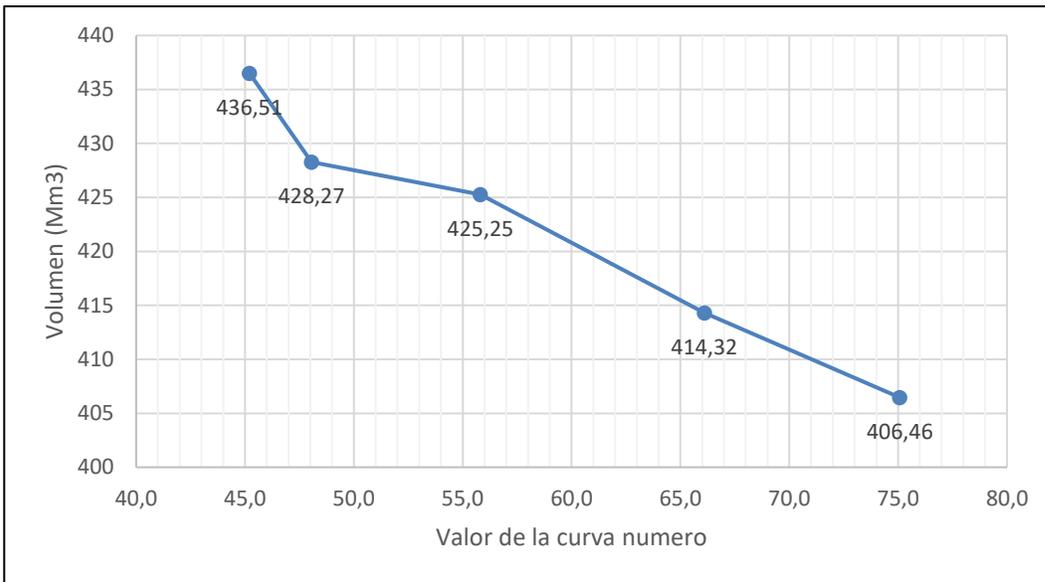
Fuente: elaboración propia, con base en la figura 28 y la tabla XVII.

Figura 44. **Balance hídrico, recarga potencial del acuífero**



Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXXIV.

Figura 45. **Comparación del cambio de curva número y la Recarga potencial del acuífero de la cuenca del río Cahabón**



Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXXIV y en la tabla XVII.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Según información presentada en la Figura 25, Figura 26 y Tabla XVIII, relacionadas a la información histórica meteorológica, se puede determinar que la cuenca del río Cahabón se caracteriza por presentar lluvia durante todo el año. El comportamiento de la lluvia para el mes de enero oscila entre los 42,80 a 168,16 mm, para el mes de febrero suele presentar lluvias entre 27,65 a 82,02 mm. El mes de marzo y abril se caracterizan por presentar la menor cantidad de lluvia promedio, oscilando entre los 25,20 a 156,96 mm y 21,24 a 145,12 mm respectivamente.

En cuanto al mes de mayo existen precipitaciones que van desde los 64,20 mm hasta los 369,17, en junio desde 157,53 a 358,27 mm. Los valores acumulados del mes de julio se encuentran 138,61 a 491,68 mm. El mes de agosto tiene la particularidad de estar influenciado por la actividad ciclónica del Caribe, lo que causa precipitaciones pluviales variables desde los 93,08 hasta los 406,77 mm. En el caso del mes de octubre tiende a oscilar entre 72,74 a 380,28 mm, noviembre va desde los 36,05 hasta 226,90 mm. Por último, diciembre posee valores acumulados desde los 28,39 hasta 101,48 mm.

A partir de la información obtenida en la Tabla XVI se logró identificar que el coeficiente de compacidad corresponde a una cuenca de forma oval oblonga, mientras que el factor de forma de la cuenca se encuentra clasificado como una cuenca alargada. La forma de la cuenca caracteriza la rapidez con la cual la cuenca drena la escorrentía superficial, en este caso los coeficientes mencionados representan una cuenca de forma irregular lo que la hace poco susceptible a crecidas en comparación a una cuenca con la misma área, pero

forma más semejante a un círculo. El comportamiento del ciclo hidrológico en una cuenca no depende únicamente de las características de forma de esta sino también en las condiciones meteorológicas, características del suelo y su cobertura.

Los efectos de la impermeabilización en el suelo de una cuenca generan tendencias a disminución de la evapotranspiración potencial, reducción de la infiltración y aumento de los caudales picos escurridos; al mismo tiempo, los caudales base disminuyen durante la época de estiaje debido a la disminución de la recarga del acuífero. Con los modelos hidrológicos generados con HEC-hms y un análisis de los cambios del uso de suelo se logra mejorar el entendimiento de los fenómenos hidrológicos que operan en una cuenca y cómo los cambios en la cuenca pueden afectar estos fenómenos.

El cambio de uso de suelo a través de los años muestra una clara disminución en la cobertura boscosa en la cuenca del río Cahabón y una tendencia del aumento de la región impermeable (edificaciones) y los terrenos de cultivos. En la Figura 29 sobre Variación del uso de suelo de la cuenca los resultados señalan que los cambios de uso del suelo han variado en diferentes periodos, demostrando que el mayor aumento de área impermeable y cultivos se dio durante los años 2015 al 2018, aumentando 82,2 km² y que del año 2005 al 2010 se dio la mayor disminución de cobertura de bosque perdiendo 114,3 km². A lo largo de los 19 años de análisis fue la cobertura boscosa que experimentó la mayor disminución pasando de 52,3 % a 24,6 % del área total analizada (778,9 km²). Esta tendencia produce disminución de la evapotranspiración potencial además de reducción de la infiltración y aumento de los caudales escurridos.

Por otra parte, en la Figura 29 se muestra como de la mano del cambio del uso de suelo se produce un cambio en la curva número del terreno. El valor de la curva número ponderada muestra una tendencia de crecimiento, dando como resultado un aumento del 66,1 % desde el año 1999 hasta el año 2018. Como la teoría lo plantea, el aumento del valor de la curva número incrementa el potencial de escorrentía de la cuenca del río Chabón y se minimiza la porción de lluvia que será infiltrada al suelo.

Como consecuencia al cambio de uso de suelo basado en las proyecciones arrojadas por los modelos generados con el programa HEC-hms, se pudo determinar que el caudal pico vario al aplicar diferentes condiciones de suelo, como lo muestra la Tabla XXV. Comparando el año 1999 con el año 2018 el caudal pico aumento en un 17,8 % para el cauce del río Chabón. También, se puede notar como en la Figura 36 se muestra como el caudal medio anual aumento de 15,36 a 19,81 m³/s. Además, esta grafica presenta una disminución inusual del caudal para el año 2015 (9,98 m³/s), lo cual se justifica pues las precipitaciones estuvieron levemente debajo del promedio y los meses entre mayo y agosto fueron críticos ya que las lluvias fueron considerablemente escasas.

Otro valor de interés para comprender el comportamiento del modelo lluvia escorrentía y su relación con el cambio de uso de suelo es el caudal de estiaje de los diferentes años de análisis. En la figura 42 se nota una clara tendencia de la disminución del caudal de aguas bajas, comportamiento que se puede interpretar como una reacción al aumento de la impermeabilización del suelo, que implica una disminución de la recarga hídrica.

Además, se hace evidente que la interacción entre el cambio de uso de la tierra y la disponibilidad del agua es un proceso dinámico. Por medio de los

balances hídricos de recarga potencial del acuífero se demuestra una tendencia a la disminución de la recarga a través de los años, tabla XXIV. Esta disminución está directamente relacionada al decrecimiento de la cobertura boscosa y aumento de la región impermeable de la cuenca. Como se ha mencionado anteriormente este comportamiento en el cambio de uso de suelo aumenta el valor de la curva número y por consiguiente disminuye la capacidad de infiltración, con base en los resultados de la figura 28 y la tabla XVII.

La figura 44 muestra como el volumen captado por el acuífero paso de 436,51 mm³ en 1999 a 406 m 43 mm³ para el año 2018. Por ende, la disponibilidad del recurso hídrico se ve afectado por este fenómeno pues el reservorio natural subterráneo del recurso hídrico de la región disminuirá con los efectos de la deforestación y urbanización.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que del año 1999 al 2018 existe una tendencia a la pérdida de cobertura boscosa pasando de cubrir el 52,3 % (407,6 km²) de la cuenca a tan solo el 24,6 % (191,7 km²). Durante el mismo periodo el área de edificaciones aumentó de 9,2 a 38,2 km². La cobertura por tierra cultivada también aumento, pasando de cubrir el 42,3 % del terreno a 55,7 %. Por último, el análisis de imágenes satelitales Landsat 8 y mapas proporcionados por MAGA mostro que la cobertura por áreas abiertas (pastizales, cementerio, entre otro) aumentó del 4 % a 14,6 %. Las tendencias del cambio de uso de suelo alteran directamente el valor de la curva número ponderada del terreno, aumentando de 45,2 a 75,1, corroborando una tendencia a la impermeabilización del terreno.
2. Como respuesta al cambio de uso de suelo de la región y con apoyo de los modelos de lluvia escorrentía generados con HEC-hms 4,4 se logró detectar un aumento de un 17,8 % del caudal pico del cauce del río Cahabón con respecto del año inicial analizado hasta el año 2018. Además, el caudal promedio anual aumento un 29,0 % durante el mismo periodo de tiempo. Por último, a través de las curvas de duración de caudal se obtuvo el comportamiento del caudal de estiaje, demostrando que su disminución es directamente proporcional al aumento de la impermeabilización del suelo y por tanto directamente proporcional a la disminución del potencial de la recarga hídrica. Del año 1999 al 2018 el caudal de estiaje decreció en un 39,5 % (disminuyendo de 11,22 m³/s a 6,79 m³/s).

3. La disponibilidad hídrica por reservorios subterráneos ha disminuido como consecuencia del aumento del área impermeable (aumento 3,71 % sobre el área total de la cuenca) y disminución del área boscosa de la cuenca (disminución de un 27,7 %). La tendencia se refleja con la disminución de un volumen de 436,51 mm³ en 1999, a 428,27 mm³ en 2005, posterior 425,25 mm³, alcanzando un valor de 414,32 mm³ en 2015, para finalizar con un valor de 406,46 mm³.

RECOMENDACIONES

1. Fomentar que las entidades del estado como INSIVUMEH e INDE monitoree regularmente el funcionamiento, mantenimiento y operación de las estaciones hidrométricas y meteorológicas a su cargo, como respuesta a la escasez y carente consistencia en la calidad de información meteorológica e hidrométrica. Además de la creación de nuevas estaciones en la región de Alta Verapaz y Baja Verapaz.
2. Buscar imágenes de Teledetección Landsat 8, metodologías o productos libres de nubes y sombras, para evitar la interferencia de la cubierta nubosa sobre el análisis del uso de suelo.
3. Realizar estudios de suelos periódicamente para actualizar y corroborar la información relacionada a las propiedades del suelo.
4. Mantener un constante monitoreo de los caudales del río Cahabón para generar nuevas líneas de estudio relacionados a los impactos del uso de suelo y el ciclo hidrológico.

BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO MIJARES, Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Grupo Noriega Editores, LIMUSA, 1992. 302 p.
2. BARDALES ESPINOZA, Walter. *Hidrología*. [en línea]. <<http://walterbardalesrecursoshidricos.blogspot.com/2009/12/curva-de-duracion-de-caudales.html>>. [Consulta: 18 de agosto de 2019].
3. CABRERA, Juan. *Calibración de Modelos Hidrológicos*. [en línea]. <http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf>. [Consulta: 25 de marzo del 2020].
4. CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill, 1993. 577 p.
5. FASSABENDER, Hans. *Química de suelos, con énfasis en los suelos de América Latina*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1987. 363 p.
6. FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la Subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. Trabajo de graduación de Maestría en Ciencias de la Atmósfera, Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica, 2015. 123 p.

7. Global Water Partnership. *La situación de los recursos hídricos en centroamérica: hacia una gestión integrada*. [en línea]. <<https://www.iagua.es/noticias/publicaciones/14/01/30/recursos-hidricos-en-centroamerica-hacia-una-gestion-integrada-44423>>. [Consulta: 15 de septiembre del 2019].
8. HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, Alberto, et. al. *Variaciones en algunas propiedades del suelo por el cambio de uso de la tierra, en las partes media y baja de la microcuenca Membrillo, Manabí, Ecuador*. [en línea]. <<http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v38n1/ctr06117.pdf>>. [Consulta: 8 de octubre de 2019].
9. Herrera Ibáñez, Isaac. *Manual de hidrología*. Guatemala: CEDIA, 1995. 223 p.
10. Instituto Geográfico Nacional. *Atlas Hidrológico*. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_hidro.htm>. [Consulta: 26 de agosto de 2019].
11. Instituto Nacional de Bosques; Consejo Nacional de Áreas Protegidas; Universidad del Valle de Guatemala; Universidad Rafael Landívar. *Mapa de cobertura forestal de Guatemala 2010 y dinámica de la cobertura forestal 2006 – 2010*. Guatemala: Serviprensa, 2012, 111 p.
12. MASEK, Jeffrey; TAYLOR, Michael. *About Landsat Science*. [en línea]. <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>>. [Consulta: 13 de enero de 2020].

13. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Informe ambiental del estado de Guatemala 2016*. [en línea]. <<https://www.marn.gob.gt/Multimedios/8879.pdf>>. [Consulta: 7 de febrero de 2020].
14. MUÑOZ GÓMEZ, Fernando Andrés; SARMIENTO GALICIA, Leopoldo; HUMBERTO PÉREZ, Edier. *Agricultura migratoria conductor del cambio de uso del suelo de ecosistemas alto-andinos de Colombia*. [en línea]. <<http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v16n1/1692-3561-bsaa-16-01-00015.pdf>> [Consulta: 8 de febrero de 2020].
15. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. *Guía para la descripción de suelos*. [en línea]. <<http://www.fao.org/3/a0541s/A0541S.pdf>>. [Consulta: 25 de enero de 2020].
16. SCHOSINSKY, Gunther. *Cálculo recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. Costa Rica: Revista Geológica de América Central, 2006. 30 p.
17. TRONCOSO GALLARDO, David Eduardo. *Simulación hidrológica del efecto del cambio de uso del suelo sobre el caudal en la cuenca del río Cruces*. [en línea]. <<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfci853s/doc/bmfci853s.pdf>>. [Consulta: 2 de Julio de 2019].
18. USGS. *Landsat 8 Instruments*. [en línea]. <<https://www.usgs.gov/land-resources/>>. [Consulta: 13 de enero del 2020].

19. VON ZABELTITZ, Wilfried O. Baudoin FAO. *Greenhouses and Shelter Structures for Tropical Regions*. Roma: FAO, 1999. 122 p.

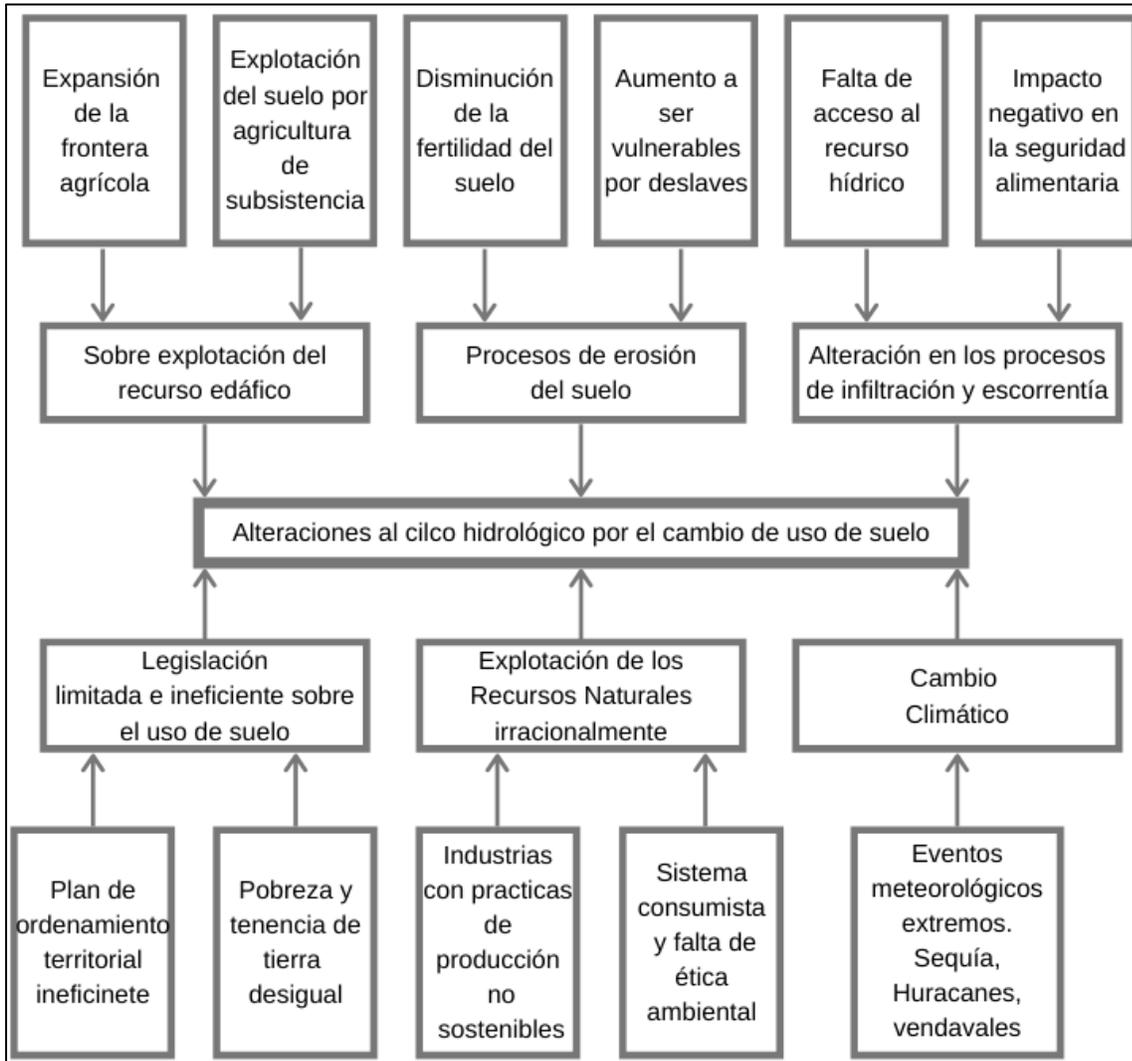
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Ambiental	Aguas	Hidrología	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de conceptos sobre ciclo hidrológico (fases y procesos), la cuenca hidrográfica y conceptos de hidrología superficial. • Caracterización de un cuerpo de agua
		Manejo adecuado de cuencas hidrográficas	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de información básica sobre los conceptos biofísicos y socioeconómicos del área de estudio. • Conceptos del Acuífero
	Topografía	Topografía 3	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo adecuado de coordenadas (geográficas y UTM, GTM)
		Taller de sistemas de información geográfica	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de los sistemas de información geográfica para el análisis del espacio físico. • Digitalización de información y elaboración de mapas.
	Complementaria	Climatología	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretación de las principales variables climáticas • Relación de variables climáticas con las condiciones del río Cahabón
	Sanitaria	Geología	<ul style="list-style-type: none"> • Características del suelo y sus categorías

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa o árbol de problemas



Fuente: elaboración propia, empleando Word 365.

Apéndice 3. Precipitación mensual acumulada por subcuenca

Fecha	Cahabón 1	Cahabón 2	Cahabón 3	Cahabón 4	Cahabón 5	Cahabón 6	Cahabón 7	Laguna Chichoj	Matanzas	Río Chicoy	Río Nestelá	Río Tzunutz
ene-05	80,1	74,1	65,0	58,7	45,1	43,1	41,4	42,7	23,2	72,1	60,7	82,4
feb-05	27,7	36,5	32,3	33,5	25,7	23,6	17,1	24,5	8,7	33,3	28,0	31,2
mar-05	133,7	213,2	189,8	191,8	149,9	148,6	109,4	148,7	52,7	191,5	169,3	146,0
abr-05	61,7	75,7	67,8	72,9	58,7	47,1	37,4	53,3	23,2	69,2	58,6	65,2
may-05	119,6	98,7	98,9	104,0	91,2	94,6	100,0	88,7	103,0	99,5	97,0	112,2
jun-05	390,3	324,7	317,6	313,8	298,0	298,7	308,4	296,3	300,0	331,1	318,4	374,3
jul-05	388,1	299,2	286,4	278,0	255,4	253,8	268,6	251,4	277,8	310,0	289,5	374,1
ago-05	393,7	306,8	305,3	339,7	297,0	281,7	284,0	281,2	262,5	313,0	298,9	367,8
sep-05	315,5	243,3	238,7	253,8	229,9	220,9	229,9	221,9	233,3	250,7	239,4	293,9
oct-05	195,4	135,6	133,2	145,5	121,3	116,9	125,9	115,5	149,1	138,7	128,3	172,7
nov-05	63,0	64,5	59,7	64,0	56,2	45,4	43,0	51,7	30,7	60,0	53,3	58,3
dic-05	67,2	69,9	61,9	60,9	43,7	39,4	36,5	38,7	17,7	64,7	53,1	71,3
ene-06	178,5	179,8	166,7	175,1	143,7	128,8	116,6	135,0	66,9	170,6	152,1	171,5
feb-06	73,8	88,6	76,5	73,4	53,5	50,4	40,7	50,2	19,6	81,3	66,7	81,9
mar-06	55,9	71,3	64,1	68,5	51,2	46,2	35,7	48,2	19,7	64,4	55,2	56,3
abr-06	87,2	100,1	91,7	87,5	75,6	77,9	67,3	75,7	45,5	94,7	86,1	89,8
may-06	228,6	222,1	222,8	240,3	218,0	225,1	213,7	218,1	207,9	218,7	216,5	218,7
jun-06	390,3	305,2	302,4	310,8	293,5	280,2	288,8	290,3	305,4	314,1	299,4	367,4
jul-06	323,1	254,0	238,3	225,8	205,9	202,7	208,8	201,7	198,5	259,0	236,0	313,0
ago-06	201,5	169,3	167,3	184,9	170,0	155,4	155,7	161,1	139,1	172,9	165,8	198,7
sep-06	214,8	171,5	169,0	182,5	175,9	159,5	152,6	172,0	144,2	174,6	165,0	203,6
oct-06	231,0	189,2	182,1	210,6	168,7	145,0	152,6	152,2	155,9	186,5	168,6	216,3
nov-06	110,4	110,5	106,9	135,0	118,6	81,8	79,5	103,9	66,2	104,5	92,4	114,0
dic-06	75,1	79,0	69,5	69,2	50,5	44,9	37,0	46,3	19,8	72,0	58,6	74,3
ene-07	107,5	103,8	90,7	81,8	62,5	58,8	56,2	58,7	30,6	100,7	84,2	114,4
feb-07	33,5	41,1	35,5	35,1	25,5	23,6	18,1	24,0	9,3	37,4	30,5	37,3

Continuación del apéndice 3.

mar-07	66,0	94,1	83,1	89,9	70,4	60,1	42,9	66,7	20,0	82,2	68,8	66,9
abr-07	46,8	61,5	56,6	58,5	50,4	48,1	37,3	49,6	20,2	56,4	50,5	50,8
may-07	65,1	64,3	63,9	67,6	59,0	61,9	62,0	58,5	73,4	62,6	61,6	60,1
jun-07	315,7	291,5	288,3	287,7	274,1	286,4	289,3	275,1	283,2	297,1	294,0	317,3
jul-07	279,9	197,7	187,9	184,3	169,7	160,2	168,5	164,2	167,3	205,9	186,8	266,4
ago-07	473,4	376,5	364,9	381,4	340,3	318,5	313,0	307,5	286,4	326,0	301,2	368,2
sep-07	300,4	240,7	238,7	254,8	242,3	226,5	230,2	235,9	239,4	245,2	236,9	274,5
oct-07	326,0	282,4	268,0	291,7	240,6	216,5	223,8	221,3	229,8	277,1	252,1	306,9
nov-07	133,5	125,3	113,7	122,4	95,4	77,1	73,9	84,1	53,2	119,2	100,2	136,6
dic-07	34,6	37,1	32,6	31,7	23,7	22,1	18,7	22,2	10,0	34,2	28,3	35,5
ene-08	472,4	436,7	394,3	357,3	305,8	273,3	240,8	216,2	158,7	199,3	153,0	144,9
feb-08	47,1	66,8	58,7	60,9	45,8	43,1	29,7	43,5	13,5	59,5	49,7	53,5
mar-08	71,7	82,2	72,9	72,5	55,3	49,2	42,7	52,1	23,8	75,0	63,7	68,9
abr-08	66,3	76,1	70,8	69,4	58,8	62,3	53,8	59,0	33,5	72,6	66,8	71,3
may-08	161,3	178,8	168,4	173,5	151,3	154,7	137,9	151,2	109,9	168,9	158,7	155,4
jun-08	249,4	221,7	218,3	218,8	210,2	215,6	214,8	209,8	209,1	223,9	219,3	241,3
jul-08	685,2	508,3	478,3	459,7	410,2	404,5	430,0	402,4	438,2	527,6	480,8	657,4
ago-08	302,3	242,6	248,2	273,1	246,8	255,7	251,0	240,8	235,5	251,5	251,3	289,9
sep-08	373,0	291,0	290,7	315,0	294,4	275,3	284,6	286,9	310,8	300,1	290,8	341,5
oct-08	220,0	185,6	181,1	212,9	186,9	155,7	152,3	169,9	162,4	178,7	161,4	208,7
nov-08	39,2	42,2	38,9	41,0	34,5	29,2	29,1	31,6	20,3	39,8	35,8	38,5
dic-08	53,7	50,3	45,4	48,4	36,3	32,3	27,8	33,4	16,4	46,2	39,2	46,3
ene-09	130,9	113,8	102,6	97,0	77,3	73,4	71,9	73,5	49,6	116,8	101,3	143,3
feb-09	62,6	92,0	78,5	67,7	53,1	50,8	43,2	49,4	22,6	82,5	68,6	74,6
mar-09	22,9	37,2	33,9	38,6	30,7	27,3	18,5	29,5	8,5	33,1	29,3	25,1
abr-09	45,9	61,9	58,1	59,9	53,2	53,6	41,4	53,0	27,4	57,1	52,7	50,6
may-09	191,2	171,8	172,7	188,4	163,0	174,0	170,1	162,2	174,2	170,7	168,4	180,1
jun-09	245,9	220,2	217,1	219,1	203,8	209,7	215,9	201,9	201,6	225,1	220,1	250,1
jul-09	271,9	185,1	174,1	165,8	148,7	146,0	157,8	145,4	159,4	192,7	173,7	250,7
ago-09	238,2	185,4	180,4	200,8	170,6	162,8	159,4	160,4	136,9	187,7	176,3	219,1
sep-09	260,5	193,8	188,9	201,5	188,5	166,1	155,7	167,3	141,3	153,2	140,0	173,2
oct-09	177,0	147,8	137,9	135,4	113,4	104,9	106,3	92,2	100,4	103,5	90,8	102,6
nov-09	149,7	154,2	146,5	155,2	128,9	123,4	123,4	121,2	97,2	148,4	137,9	151,4
dic-09	113,3	129,3	115,9	117,9	89,9	85,2	69,2	85,2	36,3	118,9	101,0	118,5
ene-10	55,7	53,3	47,0	44,2	33,7	31,1	29,5	31,4	16,7	51,8	43,6	58,6
feb-10	34,9	46,6	41,4	43,7	32,8	30,7	22,0	31,6	10,3	42,5	35,9	39,5

Continuación del apéndice 3.

mar-10	21,5	33,6	30,0	31,7	26,4	23,5	17,9	25,0	8,4	29,4	25,9	21,8
abr-10	132,4	163,9	156,1	153,1	133,1	149,2	128,8	137,5	91,4	157,8	152,1	142,3
may-10	323,9	295,4	288,5	302,3	258,7	270,9	270,4	255,7	263,8	293,7	283,2	307,3
jun-10	263,8	219,4	215,3	223,1	213,7	205,4	203,8	210,9	203,6	221,4	211,4	250,5
jul-10	510,3	385,1	363,5	352,4	319,1	306,9	322,1	310,2	315,7	398,7	363,7	494,7
ago-10	509,6	369,9	372,1	400,2	346,9	360,3	398,2	332,9	412,8	386,9	380,8	466,0
sep-10	394,9	328,6	324,9	359,3	336,6	305,9	289,9	328,4	278,0	334,2	318,7	373,2
oct-10	82,8	71,8	71,1	82,4	71,0	65,5	62,3	66,3	58,3	70,1	66,6	75,1
nov-10	79,6	85,5	79,9	84,6	74,5	67,0	63,2	70,0	47,1	82,4	76,9	77,5
dic-10	58,6	68,1	59,7	56,9	42,8	39,2	32,8	40,0	17,8	61,8	51,0	60,7
ene-11	122,2	123,7	106,9	96,8	71,4	66,0	62,8	66,0	32,2	118,9	98,3	132,5
feb-11	39,2	51,5	45,0	45,8	34,1	30,8	22,8	32,1	11,3	46,7	38,5	44,4
mar-11	56,1	85,5	78,2	89,6	69,8	67,1	48,0	67,9	23,0	75,9	68,7	56,0
abr-11	111,6	135,9	130,6	136,3	129,2	125,3	102,8	128,6	62,9	131,1	126,3	118,5
may-11	152,5	145,3	141,8	141,0	125,1	136,0	138,5	126,4	136,1	144,5	140,9	148,4
jun-11	364,9	324,9	313,2	307,8	277,0	293,0	292,1	275,9	271,6	332,4	318,7	369,7
jul-11	448,9	342,4	327,1	322,1	294,3	294,6	299,3	291,1	296,5	353,8	330,7	420,5
ago-11	390,5	288,9	293,0	319,1	279,8	286,1	294,5	272,7	289,7	302,7	296,2	365,4
sep-11	411,7	325,6	321,1	353,0	319,7	299,5	293,7	311,7	302,6	335,7	318,7	390,6
oct-11	375,6	320,2	316,9	381,2	319,4	274,2	284,0	291,1	292,0	319,5	302,1	351,4
nov-11	79,8	89,5	81,8	87,8	74,5	60,6	57,4	67,7	43,1	82,9	72,8	79,9
dic-11	73,0	97,6	84,4	82,4	60,6	57,5	45,0	56,7	21,1	88,5	73,3	84,4
ene-12	94,3	78,8	69,7	78,1	54,1	42,9	41,7	44,9	29,1	73,9	62,0	76,9
feb-12	70,2	88,4	78,3	79,6	57,9	56,3	44,4	55,1	17,4	83,0	71,3	80,1
mar-12	62,5	89,0	80,3	87,9	67,6	61,4	45,5	64,4	23,1	80,4	69,8	68,3
abr-12	91,0	121,7	114,7	115,5	101,8	104,8	84,0	102,8	51,0	113,1	105,7	98,3
may-12	209,5	191,0	185,9	190,1	167,8	172,0	169,6	165,8	165,9	188,6	179,3	202,2
jun-12	315,2	261,5	256,7	255,1	236,4	245,3	261,7	233,2	266,0	264,9	257,9	294,4
jul-12	261,4	196,6	181,5	175,6	155,6	145,1	151,2	148,5	141,1	200,9	178,3	251,5
ago-12	382,8	326,4	328,9	364,5	327,0	325,8	310,3	316,9	283,5	333,1	325,8	376,9
sep-12	204,5	167,3	171,9	199,6	195,8	177,2	159,7	193,4	148,6	172,1	169,8	191,1
oct-12	204,8	171,2	168,5	204,9	173,2	148,2	138,1	161,3	142,1	168,9	155,1	192,3
nov-12	68,1	78,8	72,7	78,9	68,0	57,6	52,6	62,7	44,4	73,7	66,6	68,1
dic-12	68,2	76,2	67,5	70,0	48,7	41,9	35,4	43,9	21,5	70,4	56,4	78,1
ene-13	453,3	435,6	393,1	356,4	306,2	267,1	232,5	204,5	161,1	164,7	117,7	96,9
feb-13	33,4	44,0	37,8	37,8	27,3	23,8	18,2	25,0	9,6	39,3	31,6	36,8

Continuación del apéndice 3.

mar-13	85,9	133,3	116,1	112,1	88,5	86,5	62,1	87,4	30,4	121,7	104,9	101,2
abr-13	77,4	83,9	78,3	74,7	65,8	71,0	64,4	66,9	51,2	81,4	76,7	77,9
may-13	172,7	158,2	149,7	158,3	134,0	126,7	124,0	128,2	124,7	152,0	138,5	159,9
jun-13	296,1	295,0	292,4	310,3	304,5	281,4	262,4	298,6	253,7	293,6	285,5	298,8
jul-13	344,0	300,4	282,5	279,9	265,5	240,8	236,9	256,7	235,0	302,8	278,1	340,0
ago-13	247,4	198,2	199,9	214,5	189,3	196,6	209,5	184,0	215,5	208,1	205,6	246,9
sep-13	366,0	291,1	288,6	312,0	291,9	275,0	276,4	285,4	292,9	299,0	287,2	343,9
oct-13	323,5	271,4	259,0	310,3	256,7	206,9	195,6	233,8	207,4	264,3	233,0	304,2
nov-13	140,5	170,1	152,6	168,3	149,5	115,0	87,2	138,1	68,2	152,6	127,9	145,1
dic-13	58,9	76,1	63,7	50,6	45,3	42,9	32,6	46,1	17,1	67,1	54,7	57,4
ene-14	76,5	77,8	66,7	61,2	45,4	38,9	37,0	41,0	23,5	73,2	59,0	80,7
feb-14	33,2	43,8	37,5	37,3	26,7	23,4	18,0	24,4	9,4	39,0	31,3	36,5
mar-14	54,6	63,0	56,1	61,0	40,6	36,0	28,9	35,7	22,1	54,4	42,9	54,3
abr-14	59,0	71,4	67,2	67,8	62,1	59,4	50,8	61,0	37,5	68,0	63,6	61,3
may-14	296,5	280,1	263,5	283,4	229,6	213,2	215,5	215,2	216,3	270,6	245,0	287,6
jun-14	369,4	346,6	345,8	352,3	341,6	351,3	342,3	344,9	357,7	348,0	346,9	351,8
jul-14	191,9	157,5	150,1	148,0	139,1	132,9	133,5	137,1	134,7	160,6	148,2	190,1
ago-14	235,1	186,2	184,7	193,8	172,8	180,9	186,2	167,9	188,0	189,7	185,8	213,9
sep-14	328,0	248,3	248,6	276,6	267,8	241,2	234,9	263,1	251,9	257,0	244,4	311,1
oct-14	352,3	298,8	287,2	327,2	269,6	239,3	243,7	250,2	260,4	297,7	273,5	333,7
nov-14	165,5	191,5	171,5	185,0	140,7	114,5	101,9	123,9	68,7	178,2	149,0	187,8
dic-14	47,7	57,8	49,2	47,5	38,1	30,1	24,2	34,4	14,3	50,6	40,0	47,7
ene-15	93,8	104,1	89,4	83,7	63,1	52,1	46,8	56,7	25,5	96,7	78,1	101,7
feb-15	35,2	44,9	38,6	38,6	28,0	24,9	18,9	25,9	10,1	40,2	32,4	38,3
mar-15	62,9	106,4	93,7	104,2	78,1	66,2	41,7	73,6	18,4	93,0	77,4	73,1
abr-15	96,7	121,1	111,6	115,3	95,6	91,2	81,1	90,5	56,3	114,1	103,9	106,2
may-15	97,3	92,7	88,9	101,3	86,2	75,8	75,8	80,0	75,2	90,9	84,4	96,1
jun-15	255,6	227,9	223,2	222,4	207,1	216,1	218,4	208,0	213,7	232,4	227,3	249,5
jul-15	176,0	144,9	136,3	130,0	121,9	117,8	122,9	119,9	128,9	147,8	134,6	179,9
ago-15	105,3	81,7	84,7	94,8	85,9	86,2	90,9	83,8	94,7	85,7	85,8	102,3
sep-15	286,3	221,2	218,9	238,8	220,2	200,9	211,4	213,2	245,0	227,7	214,9	273,6
oct-15	188,1	168,3	168,2	191,9	173,1	156,0	163,3	166,7	188,8	170,7	164,2	188,8
nov-15	179,9	176,6	176,5	215,6	182,6	159,4	153,9	172,5	115,8	175,7	166,5	193,5
dic-15	40,4	47,6	47,6	47,6	39,2	47,6	42,0	40,7	14,8	46,6	47,6	40,3
ene-16	74,6	64,7	64,7	64,7	47,7	64,7	57,6	50,7	22,8	66,0	64,7	74,8
feb-16	27,7	30,8	30,8	30,7	23,2	30,7	27,1	24,6	9,2	30,4	30,8	27,7

Continuación del apéndice 3.

mar-16	39,7	61,7	61,6	61,3	52,6	61,3	53,4	54,1	14,5	58,6	61,4	39,2
abr-16	69,3	77,0	77,0	77,0	69,8	77,0	73,0	71,1	53,2	75,9	77,0	69,2
may-16	77,8	63,4	63,3	63,2	57,7	63,2	63,7	58,7	66,2	65,3	63,2	78,1
jun-16	272,0	237,9	237,6	237,3	225,8	237,3	235,7	227,9	228,2	242,4	237,4	272,7
jul-16	231,4	160,3	160,2	160,1	143,2	160,1	157,4	146,2	144,5	169,9	160,1	232,9
ago-16	333,7	314,6	320,4	304,7	293,2	290,3	296,5	303,8	339,5	312,1	292,3	364,2
sep-16	270,1	226,0	228,1	242,1	235,2	206,1	253,5	232,9	305,9	225,4	218,9	244,1
oct-16	118,1	187,8	220,1	230,3	155,5	112,1	104,5	129,7	92,8	150,3	145,2	51,0
nov-16	65,5	120,4	129,3	129,3	100,5	90,2	110,6	82,8	116,1	112,0	128,8	16,7
dic-16	86,0	104,6	105,8	93,7	79,4	88,5	103,6	82,2	110,2	97,1	96,2	77,3
ene-17	78,2	95,0	110,5	120,6	103,3	92,1	91,6	84,6	32,2	98,5	102,9	113,9
feb-17	42,3	42,2	40,9	37,6	28,2	22,3	32,7	24,7	45,6	38,5	28,9	58,6
mar-17	76,1	100,4	122,0	141,8	94,0	71,8	67,3	82,0	51,5	72,7	53,1	96,2
abr-17	89,7	54,8	67,6	70,7	69,7	77,7	71,4	66,5	33,5	54,5	51,0	112,2
may-17	163,5	56,1	97,7	131,1	119,0	99,9	156,1	106,2	130,0	97,9	131,4	134,4
jun-17	403,2	303,8	306,6	321,6	299,3	297,8	299,2	295,0	238,8	337,3	354,7	319,5
jul-17	257,3	262,0	225,1	177,1	187,8	185,9	294,7	190,6	341,6	258,1	247,5	240,5
ago-17	213,5	46,8	146,5	252,9	219,6	200,1	218,7	227,9	252,2	136,8	207,2	195,9
sep-17	253,0	275,4	298,4	306,2	325,4	353,4	376,5	363,8	458,1	283,3	345,9	85,3
oct-17	270,6	267,8	368,1	439,2	341,8	316,5	376,5	299,1	306,6	343,0	396,2	426,3
nov-17	81,3	18,2	87,5	162,3	121,0	130,8	102,2	116,0	29,3	86,9	136,9	146,6
dic-17	50,6	8,8	53,1	84,3	55,4	66,1	88,1	53,3	51,0	48,7	75,9	107,7
ene-18	118,0	133,0	146,2	123,9	102,5	134,8	145,8	98,7	77,5	159,6	157,8	256,8
feb-18	38,7	36,0	39,2	38,4	35,1	39,6	76,6	33,3	73,5	44,6	46,5	80,6
mar-18	26,5	46,0	56,0	63,1	42,4	22,7	26,9	32,0	45,5	41,6	38,9	31,0
abr-18	84,2	108,8	128,9	145,8	125,8	89,6	73,6	114,8	42,2	105,4	102,2	100,0
may-18	150,0	181,8	211,7	175,9	216,2	178,7	132,1	225,5	101,4	176,5	170,9	180,3
jun-18	300,3	207,6	211,1	191,9	272,3	246,6	284,0	276,2	282,2	252,7	281,5	266,7
jul-18	148,0	172,9	171,8	135,3	109,2	134,1	230,8	107,6	163,4	166,0	164,2	184,7
ago-18	195,5	137,3	120,3	119,6	102,3	131,3	178,4	106,7	152,2	137,1	126,8	193,2
sep-18	194,9	155,6	144,8	125,3	133,2	206,6	290,7	149,0	148,0	182,0	208,1	222,3
oct-18	181,6	104,1	179,9	239,9	182,7	154,3	165,1	172,1	149,1	142,2	170,7	190,8
nov-18	88,0	93,8	102,0	106,1	91,7	69,8	48,6	79,6	31,7	104,8	97,5	133,6
dic-18	61,9	79,2	76,4	61,7	50,7	61,2	52,9	48,4	17,4	86,5	80,4	112,1

Fuente: elaboración propia, con información INSIVUMEH, INDE

Apéndice 4. **Evapotranspiración potencial diaria según Hargreaves-Samani**

fecha	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1 ene	3,0	4,1	2,7	2,9	2,7	2,3	3,5	2,8	3,3	2,1	2,6	2,9	3,8	2,8
2 ene	2,3	3,8	2,5	2,2	3,2	2,1	2,7	2,1	2,7	3,0	3,0	1,6	3,9	1,8
3 ene	2,3	3,3	2,7	1,3	3,7	2,3	2,7	1,6	2,9	2,3	3,4	2,5	3,5	1,8
4 ene	2,4	3,0	3,4	2,0	3,9	2,2	2,9	2,5	2,2	2,0	3,1	2,3	3,5	2,3
5 ene	3,3	2,3	3,5	2,6	3,5	1,9	3,3	1,9	2,5	3,5	2,1	2,4	3,5	2,1
6 ene	3,5	2,2	3,4	2,5	3,9	1,9	3,2	3,0	2,1	3,2	2,2	3,2	4,1	2,4
7 ene	3,3	1,6	3,4	3,2	3,1	3,0	2,7	3,6	2,2	1,5	2,2	3,9	3,0	2,4
8 ene	3,1	2,8	2,1	3,6	3,5	2,6	4,0	3,4	2,5	2,1	2,5	3,9	1,8	3,5
9 ene	2,5	3,5	1,9	2,9	3,4	1,5	3,9	3,9	3,2	2,7	2,9	4,1	1,8	2,9
10 ene	2,2	2,8	1,5	3,2	3,0	1,5	3,7	3,7	3,1	3,0	2,4	2,3	2,4	3,6
11 ene	2,8	2,4	1,6	3,5	2,4	1,5	3,3	2,8	2,9	3,7	2,6	2,7	2,7	3,9
12 ene	3,6	3,2	2,7	3,7	2,5	2,3	2,1	3,5	3,0	2,9	2,4	3,2	2,8	2,9
13 ene	4,4	3,4	3,3	2,8	1,8	1,9	1,9	2,6	3,9	3,1	1,9	2,0	2,8	1,4
14 ene	2,7	1,8	3,2	2,7	1,6	3,1	1,6	2,3	3,4	2,6	2,0	3,2	2,3	1,7
15 ene	1,7	2,7	3,5	3,1	1,9	4,1	2,7	2,1	3,4	2,1	2,5	3,7	2,5	2,2
16 ene	1,5	4,3	2,5	4,1	1,6	3,3	3,4	2,4	3,2	2,4	1,7	4,3	2,9	2,3
17 ene	1,5	4,2	2,4	3,6	1,5	2,8	3,6	2,8	1,5	3,1	2,5	1,8	3,5	1,8
18 ene	1,7	2,9	2,3	3,7	2,2	3,2	4,0	3,0	1,3	1,8	2,1	2,8	3,1	1,7
19 ene	1,8	2,3	3,0	3,5	2,7	3,7	3,8	2,9	1,5	2,0	2,1	2,5	3,9	2,1
20 ene	2,1	3,5	3,3	2,3	2,7	4,1	4,2	3,3	2,0	2,0	3,3	2,6	4,0	2,8
21 ene	3,1	3,2	3,4	2,2	1,9	4,4	3,3	3,5	2,4	3,0	3,0	3,2	4,0	3,1
22 ene	3,7	3,0	3,5	2,8	2,3	4,3	2,0	3,2	2,4	1,3	3,8	2,8	4,2	3,4
23 ene	3,1	3,1	3,2	2,8	3,4	4,8	3,8	3,4	2,0	3,0	3,7	1,2	3,7	2,4
24 ene	2,1	2,1	3,2	2,6	3,3	4,4	3,6	3,5	1,7	2,0	1,8	2,4	4,2	2,4
25 ene	2,9	1,9	1,4	2,4	1,7	3,0	3,9	4,0	1,5	2,0	2,1	4,0	4,5	2,0
26 ene	2,9	2,1	2,0	2,3	3,0	2,9	1,6	3,4	2,4	3,0	1,8	3,9	4,0	2,1
27 ene	3,5	2,4	3,3	2,8	3,4	2,5	2,0	2,3	2,8	3,7	1,6	3,9	2,9	2,6
28 ene	3,4	3,0	2,5	2,9	3,6	3,2	1,9	2,8	3,1	3,6	2,1	1,7	3,3	2,1
29 ene	3,0	3,2	1,7	4,1	3,3	3,7	2,5	2,0	3,6	2,9	1,9	1,8	1,9	2,2
30 ene	2,8	4,0	3,3	3,9	3,2	3,1	4,1	2,7	3,8	2,5	2,6	3,0	1,3	2,4
31 ene	3,1	3,2	3,2	4,1	2,5	1,9	3,6	2,3	2,6	2,9	2,5	4,1	2,6	1,7
1 feb	4,0	3,2	4,2	3,9	3,0	3,5	4,4	2,2	2,3	3,8	4,1	4,2	3,7	3,1
2 feb	3,7	4,4	4,6	3,8	4,1	2,6	3,3	2,3	2,1	4,1	3,9	4,4	3,4	3,5
3 feb	2,5	4,5	3,4	4,0	2,2	3,2	3,1	2,7	2,4	3,8	2,6	4,4	3,4	2,0

Continuación del apéndice 4.

4 feb	2,5	2,7	3,3	4,3	1,9	4,6	3,3	3,1	3,2	3,7	3,8	1,4	4,3	3,7
5 feb	3,3	2,9	3,3	4,3	2,0	4,3	2,6	2,5	4,1	3,9	2,1	1,6	2,5	3,3
6 feb	3,7	4,2	2,2	4,3	2,3	2,5	4,2	2,6	3,8	2,2	1,8	1,8	3,3	3,2
7 feb	3,6	2,3	2,9	2,8	2,3	3,1	4,3	2,6	4,3	2,6	2,3	2,0	3,9	3,7
8 feb	3,5	2,0	3,4	3,6	2,9	4,4	3,3	2,4	4,0	3,0	4,1	2,8	4,3	3,2
9 feb	4,1	2,1	3,7	3,8	3,4	4,2	4,0	3,0	3,2	2,5	3,9	1,9	3,6	3,2
10 feb	3,2	3,6	3,8	3,0	3,8	2,5	3,8	3,1	4,0	3,3	2,2	2,2	2,3	3,8
11 feb	2,6	4,2	3,1	3,1	4,1	3,2	2,3	3,0	4,6	4,1	3,9	2,4	3,0	4,1
12 feb	3,0	2,0	4,2	3,8	3,1	3,5	1,7	1,8	4,1	3,7	2,5	2,6	3,9	3,2
13 feb	4,2	1,7	4,6	3,8	3,7	2,7	1,9	3,3	4,4	2,5	1,8	2,3	3,4	2,7
14 feb	4,5	2,1	4,5	3,2	4,0	3,6	2,9	4,3	2,5	3,5	2,0	2,6	4,7	2,8
15 feb	3,8	4,3	4,0	3,6	3,9	2,9	2,4	4,2	2,9	4,0	2,3	4,7	4,4	2,6
16 feb	3,8	3,9	2,5	4,0	3,3	1,8	3,3	4,1	2,1	3,6	4,1	4,0	3,3	4,1
17 feb	3,7	3,8	2,3	4,4	3,8	2,8	3,9	3,7	2,4	2,5	4,4	2,6	4,1	3,3
18 feb	3,5	3,4	2,2	4,1	4,4	2,1	3,9	4,6	3,7	2,9	1,9	3,0	4,4	3,5
19 feb	3,5	3,2	3,3	3,3	4,4	3,9	3,1	3,8	4,0	3,1	1,7	2,1	4,3	3,2
20 feb	3,7	2,9	4,0	3,5	3,6	4,0	3,2	3,8	3,1	3,9	2,7	2,3	4,3	4,1
21 feb	3,5	4,1	4,8	4,3	3,8	4,6	4,3	3,2	4,2	4,1	4,1	3,6	3,9	3,6
22 feb	3,0	3,8	2,8	4,3	2,7	4,5	4,3	3,8	4,2	3,4	4,2	4,5	2,8	3,6
23 feb	4,2	4,3	3,6	3,9	2,0	4,1	3,9	4,2	4,5	3,8	3,7	4,6	4,5	3,7
24 feb	4,3	3,6	4,3	3,6	2,9	2,6	4,1	4,7	4,1	4,0	3,3	4,2	4,5	3,3
25 feb	3,7	3,9	4,7	3,4	3,3	1,8	4,2	3,6	4,7	3,6	5,0	1,9	4,3	4,2
26 feb	4,3	3,5	4,6	4,8	3,6	5,0	3,9	3,0	3,7	4,3	3,9	2,2	3,4	4,0
27 feb	4,5	3,2	4,5	2,8	3,8	1,7	4,2	3,4	3,9	4,1	3,5	2,0	4,4	3,7
28 feb	3,6	3,2	4,1	2,1	4,2	3,1	4,1	2,3	2,9	3,6	2,6	3,2	4,1	3,9
29 feb				2,9				3,5				3,4		
1 mar	3,4	3,8	5,3	2,9	3,1	5,6	3,3	4,1	1,7	4,2	3,6	4,1	4,3	4,9
2 mar	3,6	4,5	4,9	3,4	2,7	3,1	3,3	5,1	1,4	4,5	2,8	3,6	4,0	3,7
3 mar	4,8	4,1	4,4	4,9	2,7	2,9	4,3	5,2	2,9	4,8	3,7	3,9	3,7	3,9
4 mar	3,1	2,9	3,0	4,5	3,7	2,4	4,4	3,3	3,8	4,2	4,3	3,3	3,5	4,0
5 mar	4,6	2,5	2,4	4,5	3,6	3,5	4,9	2,2	4,8	4,1	4,9	3,3	3,7	3,5
6 mar	4,4	3,5	1,5	4,9	3,9	4,0	3,9	2,4	3,9	3,7	3,0	4,0	3,5	4,7
7 mar	5,0	3,9	3,9	5,0	4,0	3,1	3,8	3,7	2,9	3,5	3,1	4,4	4,2	4,5
8 mar	5,2	4,5	2,9	2,1	4,2	4,6	4,9	4,1	3,9	4,5	3,1	4,9	3,7	4,2
9 mar	5,2	5,1	4,2	4,1	3,7	5,9	4,9	4,1	4,3	4,1	4,4	4,9	3,1	4,7
10 mar	3,6	4,9	3,3	4,3	4,5	5,9	3,6	3,6	5,6	3,9	4,6	4,8	3,5	5,5

Continuación del apéndice 4.

11 mar	3,9	5,0	3,6	3,9	4,3	6,0	2,5	4,0	4,2	5,2	4,6	5,2	3,2	5,3
12 mar	4,0	4,9	3,6	3,7	4,3	5,5	2,9	3,9	1,6	4,5	2,9	4,1	4,1	4,8
13 mar	5,2	5,1	4,1	4,6	3,8	3,7	3,9	3,1	1,6	1,8	3,4	3,5	4,2	3,7
14 mar	5,1	4,1	4,5	5,1	4,7	5,1	4,4	3,8	2,1	2,9	3,9	4,6	2,3	3,2
15 mar	5,3	3,1	4,9	5,1	4,3	5,2	4,1	2,8	2,5	4,5	3,9	4,9	2,6	3,8
16 mar	5,4	3,7	4,2	5,0	4,5	4,6	3,0	4,2	3,9	5,1	3,3	5,3	2,4	4,9
17 mar	4,1	4,3	3,4	4,6	3,8	2,4	3,1	4,4	5,1	3,7	3,9	4,8	3,7	4,6
18 mar	3,5	4,5	3,3	5,2	3,5	2,4	3,5	4,6	5,1	4,9	4,2	5,1	3,2	4,9
19 mar	4,9	4,7	3,3	5,0	4,0	4,7	3,9	4,6	5,1	4,6	4,6	5,4	3,8	5,2
20 mar	5,0	5,3	4,3	1,4	3,7	5,7	2,1	5,2	4,8	4,3	4,5	3,0	4,0	4,8
21 mar	5,2	5,4	2,9	3,3	3,2	2,1	3,8	4,7	4,2	4,1	4,5	2,4	4,2	3,8
22 mar	5,4	4,1	3,0	3,6	3,3	2,8	3,8	3,9	5,2	4,7	4,8	2,7	3,8	4,0
23 mar	3,9	4,8	3,8	3,8	3,8	4,2	4,8	4,4	5,5	4,6	4,0	4,7	4,4	3,3
24 mar	5,3	3,0	4,1	2,7	4,1	4,6	4,7	4,2	5,5	4,6	4,5	5,1	4,4	4,1
25 mar	5,3	2,2	4,0	2,6	4,8	5,3	4,7	4,4	1,9	4,5	4,8	4,7	4,9	4,9
26 mar	5,0	3,2	4,3	3,5	5,1	2,8	4,9	4,4	2,3	4,1	5,2	5,0	4,5	4,6
27 mar	5,4	3,6	4,7	3,6	5,1	5,0	4,9	4,6	1,7	4,7	4,2	4,9	5,2	4,3
28 mar	4,2	3,8	4,1	4,9	5,2	5,1	5,6	4,4	3,4	5,1	3,0	4,5	5,0	4,6
29 mar	4,9	4,4	4,2	4,4	3,9	2,9	5,6	4,7	3,7	5,1	4,4	4,8	5,3	5,0
30 mar	5,0	4,2	3,5	4,7	5,2	4,1	5,5	4,9	4,2	3,7	3,4	5,2	5,3	4,2
31 mar	5,1	3,9	4,0	4,8	5,4	4,8	4,8	5,1	4,8	4,6	4,1	5,6	4,4	3,6
1 abr	5,4	3,9	4,5	5,3	5,4	5,0	4,7	4,8	5,6	4,7	4,6	5,8	5,9	4,3
2 abr	2,8	4,1	4,4	4,5	5,9	5,6	5,0	5,6	5,4	4,6	4,1	4,3	6,0	4,9
3 abr	3,2	4,4	4,1	4,1	5,0	4,9	5,0	5,7	5,8	5,3	4,2	2,1	6,1	5,3
4 abr	4,4	4,3	3,8	5,7	5,6	4,3	5,6	5,6	4,7	5,2	4,3	3,5	5,7	5,4
5 abr	4,7	4,6	4,0	5,3	5,6	3,5	4,9	5,5	2,8	4,3	4,5	2,8	5,4	4,1
6 abr	5,4	5,4	3,9	5,6	5,2	4,5	4,5	4,9	3,6	5,6	3,9	3,8	4,3	4,6
7 abr	4,7	5,8	3,8	5,1	2,1	5,5	4,8	5,2	5,1	5,7	4,3	4,0	4,0	5,2
8 abr	4,4	5,2	4,0	5,3	3,6	5,2	4,9	5,2	5,2	1,9	3,6	4,3	4,3	5,4
9 abr	5,5	3,6	4,6	5,2	5,2	3,6	4,8	4,6	5,3	3,7	4,8	4,2	5,1	5,3
10 abr	5,8	3,8	5,5	5,7	5,3	4,2	5,2	3,5	5,5	3,8	4,6	4,6	5,0	4,7
11 abr	6,1	3,9	5,8	5,2	5,5	4,7	5,5	4,4	6,0	4,8	4,5	5,5	4,6	3,9
12 abr	4,9	3,5	5,3	4,8	5,4	4,8	4,8	4,6	4,3	4,4	5,1	5,5	4,5	3,2
13 abr	4,0	3,2	5,3	3,3	5,7	4,4	4,4	4,6	4,7	5,1	5,3	5,6	4,2	5,4
14 abr	4,2	4,0	6,0	3,5	4,5	4,7	5,3	4,8	5,0	5,4	5,0	4,9	4,6	5,6
15 abr	2,5	4,8	4,0	2,4	4,6	4,7	5,8	5,1	5,2	4,0	5,0	4,9	4,9	3,0

Continuación del apéndice 4.

16 abr	3,4	5,5	3,8	3,5	5,2	4,3	5,0	5,3	5,6	2,8	4,8	5,4	4,5	3,6
17 abr	3,5	5,4	5,5	4,0	5,2	4,8	4,5	4,8	4,8	4,5	5,4	5,0	5,0	4,3
18 abr	3,4	5,6	5,7	4,9	4,8	4,3	5,5	4,3	5,6	4,5	5,6	4,8	4,8	5,0
19 abr	4,4	5,5	4,6	4,3	5,1	4,6	5,6	4,3	5,2	4,3	5,4	5,0	4,9	4,6
20 abr	5,4	5,1	4,9	3,8	4,1	4,9	5,2	5,7	4,9	3,9	5,6	4,4	4,6	4,3
21 abr	5,6	4,4	4,7	5,3	3,0	4,2	4,6	4,7	4,5	4,5	4,7	5,0	4,6	4,8
22 abr	5,0	4,1	4,6	4,9	4,1	4,8	4,5	3,6	4,4	4,6	4,9	4,9	4,9	5,1
23 abr	4,6	4,7	4,3	4,8	4,6	5,6	5,0	3,9	4,6	4,9	5,1	4,5	3,6	4,6
24 abr	4,1	4,6	5,0	5,3	4,2	6,1	5,0	4,0	5,1	5,2	5,3	5,0	3,9	4,8
25 abr	5,8	4,5	5,3	5,6	3,6	4,9	5,3	4,7	4,2	5,3	5,3	5,3	5,6	5,0
26 abr	5,4	5,1	5,6	5,2	3,8	4,4	5,3	4,5	4,3	5,0	5,8	5,6	5,9	5,3
27 abr	4,4	4,8	4,7	5,1	4,0	5,2	5,4	4,8	4,5	5,7	6,0	5,7	5,5	4,5
28 abr	5,4	4,8	4,6	4,9	4,0	4,7	4,9	5,5	5,1	5,6	6,2	5,4	5,9	4,0
29 abr	6,0	5,6	4,2	4,0	3,3	4,8	3,8	5,6	5,1	5,4	4,4	5,8	5,9	4,9
30 abr	5,9	4,4	4,5	4,1	4,5	5,1	4,8	5,3	4,9	5,0	2,8	5,8	5,9	4,9
1 may	3,3	4,2	5,1	5,5	4,6	5,1	5,0	4,9	5,7	4,3	3,8	5,6	4,5	4,3
2 may	4,7	4,4	5,5	5,5	4,8	5,4	4,8	5,5	4,6	3,6	2,9	5,7	4,9	3,6
3 may	4,9	4,6	5,4	5,4	5,1	4,9	4,1	5,4	3,3	2,9	3,6	4,4	5,2	3,1
4 may	5,0	5,2	5,6	3,5	4,9	4,3	3,1	5,3	2,9	2,4	4,2	4,9	5,5	1,8
5 may	4,6	5,2	5,4	4,4	4,6	4,1	4,2	5,4	5,0	4,4	5,3	3,3	3,9	4,5
6 may	4,3	5,7	5,1	4,3	4,9	4,4	4,3	5,7	4,2	5,1	5,2	3,8	4,1	4,9
7 may	4,9	6,0	4,8	5,2	4,4	5,2	4,7	5,6	4,7	5,0	5,2	4,3	4,7	5,2
8 may	4,8	5,5	4,0	5,7	4,6	4,8	5,4	5,7	5,1	5,3	4,9	4,9	4,8	5,7
9 may	4,5	5,3	5,0	5,8	4,9	4,7	5,4	5,5	5,4	5,1	4,7	5,4	4,8	5,6
10 may	4,5	5,9	5,2	5,6	4,3	4,7	5,2	5,4	5,9	5,0	5,1	5,0	4,7	5,5
11 may	4,2	4,8	5,2	5,7	4,2	5,1	5,3	5,7	5,3	4,7	4,7	5,3	4,9	5,0
12 may	4,0	4,8	4,3	5,2	4,0	5,0	5,6	4,7	4,1	4,4	4,5	5,3	5,7	4,5
13 may	4,2	4,8	4,1	5,4	4,6	4,8	4,9	3,5	4,1	4,2	4,7	4,7	5,2	4,2
14 may	4,4	4,9	3,6	5,4	4,6	4,5	4,9	4,1	4,3	4,3	4,5	4,9	4,9	4,3
15 may	3,9	5,1	3,7	5,5	4,2	4,6	4,8	4,7	4,8	3,1	5,0	5,0	5,3	3,1
16 may	4,2	4,0	3,5	5,3	4,6	4,3	5,3	4,2	5,3	2,6	4,9	5,4	5,4	1,8
17 may	3,8	3,4	3,0	5,0	4,5	4,6	5,2	3,8	5,4	3,5	5,3	5,5	5,9	2,8
18 may	4,4	3,9	3,4	4,9	3,0	4,7	5,8	3,7	5,4	3,6	5,0	5,5	5,2	3,3
19 may	3,6	4,7	4,0	4,8	3,4	4,4	5,6	4,5	5,2	3,5	4,7	5,2	5,4	3,3
20 may	4,4	4,4	4,1	5,1	3,5	4,9	5,7	3,2	5,5	4,5	5,0	5,4	5,5	4,6
21 may	4,1	4,6	4,8	4,8	4,6	4,8	5,2	4,2	5,1	4,1	5,2	5,1	4,8	4,2

Continuación del apéndice 4.

22 may	4,3	4,3	5,4	5,4	4,3	4,4	5,1	4,2	5,0	4,3	4,5	4,6	4,4	4,0
23 may	5,3	4,4	5,1	5,3	5,1	4,4	5,2	4,9	4,4	3,3	4,0	5,6	5,7	3,3
24 may	5,7	3,8	5,1	5,0	5,2	4,2	5,5	5,1	4,0	4,3	4,6	5,6	5,7	4,3
25 may	5,8	4,1	4,8	4,6	5,5	3,8	5,3	4,9	4,0	4,2	4,7	5,0	5,1	4,2
26 may	5,1	5,0	4,2	4,1	5,5	3,1	5,2	4,8	3,6	4,6	4,9	4,9	4,9	4,6
27 may	4,3	4,6	4,7	4,6	5,2	3,3	5,0	4,5	3,1	4,8	5,0	5,2	4,8	4,8
28 may	4,7	4,8	4,4	4,1	5,2	3,6	5,1	4,4	4,7	5,1	4,7	5,3	4,7	5,1
29 may	4,7	4,8	5,0	3,6	4,8	2,3	5,0	4,7	3,8	5,1	4,9	4,9	4,7	5,1
30 may	5,4	4,7	4,4	2,8	4,6	4,5	4,6	4,7	5,3	3,6	4,9	4,8	4,7	3,6
31 may	5,0	4,5	3,5	3,9	4,8	5,2	4,5	5,7	5,2	4,6	4,5	4,8	4,8	3,7
1 jun	5,6	4,3	3,6	3,0	4,5	5,3	4,1	5,3	4,8	4,4	4,7	5,0	5,0	4,6
2 jun	5,4	4,3	4,7	4,0	4,2	5,7	3,8	4,6	5,0	3,2	3,7	4,9	5,2	4,1
3 jun	5,4	4,1	4,6	3,9	4,6	5,5	4,5	4,9	4,5	5,0	4,3	5,1	5,1	3,6
4 jun	5,3	4,4	4,9	3,6	4,3	5,0	4,1	4,9	4,2	4,7	4,3	5,1	4,1	4,1
5 jun	5,1	4,0	4,6	4,3	4,0	5,4	3,6	5,2	4,8	4,5	3,8	4,6	4,9	4,7
6 jun	4,9	4,0	4,9	4,6	4,8	5,5	3,4	5,6	4,8	4,4	3,9	5,1	5,7	4,6
7 jun	5,3	4,1	4,9	5,0	4,7	5,0	4,5	5,1	4,3	4,4	4,3	4,4	5,2	4,5
8 jun	4,2	4,2	4,5	4,4	4,7	5,2	4,8	4,7	4,4	4,3	4,4	5,1	5,1	3,9
9 jun	4,3	2,3	4,7	3,5	4,9	4,7	4,9	5,1	4,3	5,2	4,5	4,7	5,1	3,7
10 jun	4,7	3,5	4,5	4,2	4,6	4,7	4,5	5,1	4,7	4,7	4,8	4,9	5,3	4,2
11 jun	5,4	4,4	4,1	4,7	5,1	4,7	4,7	4,6	4,3	4,7	4,4	4,9	4,9	4,5
12 jun	4,7	4,7	4,1	4,6	4,9	4,1	4,9	4,5	4,6	4,7	4,5	4,4	5,4	4,4
13 jun	4,7	4,2	4,2	4,3	5,0	3,5	4,1	4,7	4,4	4,6	4,6	4,6	4,7	4,6
14 jun	4,5	3,8	4,2	4,5	4,7	4,3	4,6	4,1	4,5	4,7	4,9	5,3	4,4	4,7
15 jun	5,3	4,4	4,6	4,6	4,4	4,7	5,1	5,4	4,5	4,5	4,8	5,2	4,1	4,3
16 jun	5,0	4,6	5,2	4,6	4,5	4,1	4,4	5,3	4,3	4,1	4,5	4,8	4,1	5,0
17 jun	5,0	4,4	4,5	4,5	4,4	4,1	4,0	4,5	3,6	4,1	4,4	3,6	4,5	4,6
18 jun	5,1	4,4	4,3	4,6	3,9	4,4	5,0	4,5	4,3	4,3	4,4	4,2	4,5	5,1
19 jun	4,9	4,5	4,4	4,3	4,6	4,5	4,6	4,0	4,2	4,4	4,6	4,3	4,5	5,2
20 jun	4,1	4,5	3,7	4,4	3,7	4,4	5,1	4,9	4,3	4,2	4,2	4,5	4,0	5,3
21 jun	4,4	4,2	4,7	4,1	3,6	4,5	5,1	5,1	4,1	4,5	4,7	4,0	4,2	5,3
22 jun	4,1	4,3	4,6	4,4	4,1	4,3	5,2	4,6	4,1	4,6	4,4	4,3	5,2	4,8
23 jun	4,2	3,9	4,6	3,9	4,7	4,7	4,8	5,2	4,1	4,6	4,7	4,3	4,7	5,1
24 jun	4,0	3,0	4,3	3,8	5,0	4,6	4,4	5,0	4,1	4,8	4,2	4,4	4,9	4,9
25 jun	4,1	3,5	4,5	3,7	4,9	3,8	4,6	5,1	4,2	4,7	3,8	4,8	4,1	4,8
26 jun	4,4	2,9	4,1	3,5	4,9	3,5	4,4	5,0	4,1	4,7	3,9	4,3	4,8	4,5

Continuación del apéndice 4.

27 jun	4,3	3,9	4,0	3,8	5,0	4,7	4,3	5,3	4,7	4,7	4,3	3,9	4,9	3,8
28 jun	4,2	3,6	4,4	3,7	5,0	3,5	5,2	4,8	4,7	5,0	4,8	4,1	4,7	4,3
29 jun	4,3	4,2	4,6	4,2	4,5	4,8	5,1	4,7	4,4	4,6	4,7	3,9	4,4	4,6
30 jun	4,3	3,9	4,4	4,0	5,2	4,0	4,9	4,9	4,4	4,4	4,1	4,6	4,6	4,6
1 jul	15,6	14,2	15,0	13,1	16,0	18,4	15,0	15,5	13,9	15,0	15,2	14,5	15,8	16,0
2 jul	16,0	15,1	16,3	13,0	15,7	17,5	13,4	15,9	12,5	15,9	15,7	15,0	11,4	15,9
3 jul	17,2	14,1	14,8	12,9	14,4	16,9	14,1	15,5	14,8	15,4	14,3	16,8	14,2	16,1
4 jul	18,2	13,8	15,2	14,2	15,0	16,7	12,7	14,7	15,6	13,9	15,6	15,5	14,8	17,1
5 jul	16,1	17,4	15,0	16,0	14,8	16,1	12,6	15,5	15,9	14,1	13,7	15,5	15,4	12,0
6 jul	16,0	15,7	14,2	15,6	15,6	17,0	14,2	14,2	15,8	13,0	13,7	15,3	15,2	10,6
7 jul	16,3	14,7	14,4	12,0	15,0	17,3	15,0	15,3	15,1	15,3	15,0	15,7	15,2	14,4
8 jul	15,8	13,8	15,4	14,1	15,7	15,8	15,9	11,5	14,8	17,5	13,0	15,4	14,6	14,8
9 jul	15,4	13,8	16,2	12,6	14,4	14,1	16,3	14,6	10,6	15,1	12,7	12,7	14,6	12,3
10 jul	15,6	12,1	13,9	14,4	13,6	14,3	14,9	15,3	13,4	15,6	12,9	16,1	15,6	13,7
11 jul	16,6	14,2	15,7	13,5	14,8	14,6	13,6	15,9	12,8	15,6	14,4	16,7	16,5	14,4
12 jul	14,7	14,3	14,5	12,9	12,2	14,8	13,1	15,6	14,9	14,1	15,2	15,7	15,9	15,8
13 jul	12,4	12,9	12,6	13,2	12,4	14,7	13,6	16,3	14,0	13,7	15,7	15,1	13,2	13,8
14 jul	14,9	13,5	13,7	11,6	14,9	15,6	17,0	16,1	15,0	11,7	16,3	15,4	14,1	14,2
15 jul	13,7	15,4	12,8	14,6	16,4	14,7	17,9	17,1	14,2	15,3	16,9	16,5	16,3	14,3
16 jul	14,9	13,8	17,1	14,9	15,1	14,4	15,4	16,7	14,8	16,7	15,3	16,1	16,1	15,5
17 jul	13,8	13,5	15,8	14,9	14,6	13,2	15,9	16,3	12,3	17,4	15,0	14,9	16,5	16,3
18 jul	14,5	13,1	15,8	12,1	15,4	15,0	14,1	15,4	15,7	18,2	15,8	14,2	15,9	14,9
19 jul	15,0	13,3	15,6	11,6	15,4	15,4	14,8	15,1	14,7	16,4	16,5	14,9	15,8	15,1
20 jul	15,7	13,4	15,7	11,4	13,0	16,3	14,6	12,9	15,7	15,7	15,7	15,7	15,1	16,4
21 jul	11,2	14,3	16,8	13,7	16,5	14,8	15,1	13,3	16,1	16,5	16,1	15,9	13,7	16,0
22 jul	13,2	14,2	14,4	16,1	15,2	17,7	15,6	13,8	15,0	16,0	16,6	16,3	16,1	14,8
23 jul	15,3	15,3	14,4	16,6	14,2	18,3	15,1	13,8	12,7	14,8	16,5	13,3	15,7	17,1
24 jul	15,8	15,1	13,6	14,9	13,6	15,9	13,8	15,4	14,5	14,6	15,2	16,5	16,8	18,0
25 jul	15,0	16,1	14,2	13,5	14,0	16,0	13,6	15,7	14,5	14,7	14,9	15,5	16,1	16,8
26 jul	14,1	16,2	16,8	13,6	12,2	14,9	15,6	17,8	14,3	14,0	16,3	15,1	13,2	17,1
27 jul	15,4	16,7	16,1	15,3	15,2	14,4	17,7	16,7	15,2	15,9	16,0	15,9	15,6	16,5
28 jul	14,4	17,2	16,4	16,6	14,8	15,3	15,8	15,0	15,1	14,0	15,6	15,9	16,5	16,2
29 jul	12,8	14,8	17,9	17,4	14,9	14,4	15,1	14,7	14,6	12,1	15,1	16,6	16,7	16,5
30 jul	13,7	14,0	16,1	16,6	14,9	14,2	15,1	15,4	15,3	14,5	14,5	15,2	15,7	15,4
31 jul	14,4	14,6	15,1	15,7	13,9	12,3	10,7	16,5	14,7	16,2	15,7	15,3	16,8	16,4
1 ago	4,5	4,4	4,5	3,8	3,3	4,4	3,3	4,9	4,3	4,7	4,2	4,1	5,0	4,5

Continuación del apéndice 4.

2 ago	4,6	4,3	4,9	4,1	4,1	4,2	4,1	4,6	4,4	4,9	4,3	4,9	4,8	4,4
3 ago	4,4	4,8	4,5	4,4	3,7	2,7	4,3	4,9	4,3	4,7	4,7	4,2	4,7	4,5
4 ago	4,4	5,0	4,3	4,3	3,8	3,8	4,4	4,7	4,3	4,5	4,6	2,8	4,9	4,4
5 ago	3,5	4,7	4,0	3,9	4,3	4,6	5,0	4,6	3,7	4,6	4,7	4,6	4,6	3,9
6 ago	4,0	4,5	4,6	4,1	4,6	4,5	4,9	4,8	4,3	4,3	4,5	4,9	4,5	3,9
7 ago	4,0	3,5	4,4	4,1	4,6	4,5	4,8	4,3	3,7	4,5	4,7	4,9	4,7	4,2
8 ago	4,5	3,7	4,8	4,5	4,2	4,3	4,7	5,2	5,2	4,5	4,9	5,1	4,9	4,1
9 ago	4,0	4,0	4,6	4,2	4,2	4,9	5,1	4,9	5,1	4,7	4,9	4,9	5,6	4,1
10 ago	4,2	4,1	4,0	4,7	4,0	5,0	4,8	4,9	4,6	4,5	4,6	4,7	5,2	4,5
11 ago	4,4	4,0	4,4	4,6	4,1	5,3	5,0	4,2	4,1	4,6	4,7	4,7	4,4	4,8
12 ago	4,5	4,3	2,8	4,9	4,0	5,6	4,7	4,6	2,8	4,1	3,7	4,8	4,4	4,5
13 ago	4,6	4,2	3,4	4,6	4,2	5,3	4,9	4,6	3,6	4,4	4,4	5,0	4,7	4,8
14 ago	4,5	4,6	4,9	4,8	4,2	4,7	4,0	4,7	4,1	4,9	4,8	4,9	4,5	4,6
15 ago	4,3	4,7	4,8	4,5	4,4	4,7	4,0	4,4	4,0	4,4	4,5	4,4	4,9	4,6
16 ago	3,9	4,5	4,5	4,4	4,6	4,6	4,5	5,0	3,0	4,2	4,7	4,7	4,8	4,7
17 ago	4,0	4,7	4,5	4,5	3,6	4,5	4,1	4,5	4,4	4,6	4,6	4,5	4,5	4,4
18 ago	4,0	4,2	4,2	4,8	3,8	4,9	4,3	5,4	4,2	4,7	4,8	4,2	4,8	4,6
19 ago	3,9	4,5	4,5	5,1	4,1	4,9	4,2	5,3	4,4	4,6	5,2	4,6	4,5	4,6
20 ago	4,3	3,9	4,9	4,8	4,3	4,4	3,8	5,2	4,3	4,6	5,3	4,8	4,3	4,7
21 ago	3,8	4,1	5,4	5,0	4,2	4,0	5,0	4,5	3,9	4,7	4,9	4,6	4,2	3,9
22 ago	5,0	4,3	4,0	4,8	4,2	4,5	4,4	4,6	4,0	4,0	5,1	4,5	4,9	3,6
23 ago	4,3	4,4	4,3	5,1	3,8	4,4	4,4	4,3	3,8	4,5	5,0	4,6	4,1	4,1
24 ago	4,9	4,6	4,9	4,9	4,2	4,8	4,4	4,7	3,7	4,8	4,7	4,5	5,1	4,2
25 ago	4,9	4,8	4,6	4,8	4,0	4,1	4,6	4,4	4,9	4,5	4,7	4,6	4,8	4,5
26 ago	4,8	4,4	4,5	4,5	3,8	4,5	4,8	4,5	4,2	4,4	4,7	4,4	5,2	3,9
27 ago	5,3	4,1	4,3	4,8	4,7	4,2	5,0	4,5	4,3	4,4	5,0	4,4	5,3	4,1
28 ago	5,3	4,1	4,7	4,3	4,5	4,4	4,5	4,8	4,1	4,3	4,3	4,6	5,4	4,5
29 ago	5,1	4,0	4,2	4,2	4,8	4,4	4,4	4,7	3,6	4,9	4,4	4,6	5,3	4,6
30 ago	5,3	4,4	4,7	4,1	4,9	4,1	4,5	5,2	3,8	4,7	5,0	5,0	4,6	4,4
31 ago	4,8	4,6	2,9	4,5	4,4	4,8	5,0	4,4	4,3	4,2	5,0	5,0	4,6	4,7
1 sep	4,0	4,1	4,3	3,8	4,1	4,8	5,1	4,4	4,5	4,3	4,8	4,5	4,9	4,5
2 sep	4,0	4,0	4,3	4,3	4,2	4,3	5,1	4,9	3,7	4,4	4,6	4,6	4,9	4,3
3 sep	3,9	4,4	4,4	4,4	4,3	3,5	4,9	4,6	4,2	4,7	4,5	4,9	4,6	4,7
4 sep	4,0	4,4	4,0	3,8	4,6	3,8	5,3	4,7	4,2	4,5	4,6	3,7	4,6	4,2
5 sep	4,2	4,2	2,3	3,8	4,6	5,2	4,9	4,9	3,4	3,6	4,5	4,3	4,9	4,3
6 sep	4,1	4,3	4,2	4,4	4,3	5,0	4,6	4,9	4,1	3,3	4,3	4,1	5,0	4,5

Continuación del apéndice 4.

7 sep	4,0	3,8	4,6	4,0	4,3	4,7	4,8	4,7	4,3	3,3	4,3	4,1	4,7	4,6
8 sep	3,9	4,4	4,5	4,7	4,0	4,6	4,9	4,6	4,5	4,1	4,5	4,5	4,5	4,6
9 sep	4,3	4,4	4,6	4,7	4,4	4,8	4,6	3,9	4,1	4,1	4,4	4,5	4,7	4,7
10 sep	4,3	4,5	4,3	4,6	5,0	4,5	4,8	3,7	3,8	4,2	4,9	4,6	4,6	5,0
11 sep	4,2	4,5	4,2	5,2	4,9	4,5	4,0	4,3	4,9	4,0	4,7	4,9	4,0	5,2
12 sep	4,2	4,2	3,8	5,0	4,8	3,5	2,8	4,4	3,6	3,6	4,8	4,4	3,7	4,4
13 sep	4,2	4,5	3,9	4,8	5,1	4,1	2,7	4,2	3,4	3,7	4,7	4,3	5,0	4,6
14 sep	4,2	4,7	3,7	5,0	4,8	4,1	4,3	4,2	4,7	3,5	4,7	4,7	5,0	4,3
15 sep	4,0	4,6	4,1	4,1	4,9	4,2	4,4	4,3	4,4	3,2	4,3	4,3	5,1	4,5
16 sep	3,7	4,6	3,7	3,1	5,0	5,0	3,9	4,2	4,6	4,2	4,6	4,3	4,7	4,6
17 sep	3,8	4,2	3,7	3,5	4,7	4,8	4,0	4,7	3,6	4,4	4,6	4,6	4,5	4,6
18 sep	3,7	4,6	4,2	3,5	4,1	4,5	4,0	5,0	3,5	4,4	4,5	4,4	4,2	4,1
19 sep	3,5	4,3	3,8	3,1	4,0	4,5	3,7	3,9	4,5	4,6	4,7	4,0	4,4	4,1
20 sep	3,7	3,6	3,8	3,9	4,1	4,8	3,8	3,8	3,8	4,6	4,2	3,8	4,7	4,1
21 sep	3,7	4,5	4,0	4,3	3,6	4,3	4,2	3,6	4,4	4,3	3,6	4,4	4,6	4,2
22 sep	4,7	4,5	3,5	3,6	4,2	4,5	4,2	4,0	4,4	4,4	3,6	4,2	4,3	4,2
23 sep	4,7	4,3	4,0	3,6	4,1	4,1	4,1	3,9	3,9	4,0	3,7	3,6	4,4	3,7
24 sep	3,9	4,4	4,6	4,2	3,6	3,2	4,0	4,2	4,1	3,8	3,5	4,7	4,1	3,9
25 sep	4,3	4,1	4,7	3,9	4,1	2,4	4,1	4,5	4,3	3,6	3,4	4,7	4,3	4,3
26 sep	4,2	3,9	4,3	4,1	4,1	4,4	4,8	4,2	4,3	3,2	4,0	4,3	4,7	3,9
27 sep	4,5	4,2	4,4	3,6	4,2	4,2	4,7	3,3	4,3	3,4	3,7	4,5	5,1	4,0
28 sep	3,9	4,2	4,1	2,5	4,3	4,2	4,1	4,2	4,6	3,5	3,9	4,4	4,4	4,1
29 sep	3,5	3,3	4,1	3,1	4,2	2,1	4,0	4,7	4,5	4,1	4,1	4,6	4,1	4,0
30 sep	3,7	3,8	3,2	3,2	3,7	2,6	3,6	4,6	4,1	4,2	4,4	4,5	4,4	4,3
1 oct	3,2	3,6	3,5	3,5	3,3	2,2	3,3	4,3	4,0	1,8	3,1	4,1	4,0	3,9
2 oct	4,2	3,0	2,9	3,4	4,4	3,1	2,7	3,7	3,8	3,7	3,6	4,0	3,5	3,4
3 oct	3,5	4,1	4,3	2,6	4,2	2,8	2,5	2,8	4,0	4,0	3,6	4,1	4,2	3,4
4 oct	3,1	3,9	4,1	2,6	4,5	3,3	3,0	3,3	3,9	4,0	4,2	4,5	3,9	3,1
5 oct	2,7	3,3	3,9	3,4	4,2	3,1	3,2	3,8	4,2	3,9	3,5	4,6	2,5	3,3
6 oct	4,0	3,4	3,9	3,4	3,6	1,7	3,1	3,8	3,9	4,3	3,4	4,3	3,5	3,2
7 oct	3,8	2,5	3,5	3,3	3,8	3,3	3,8	3,9	3,8	4,3	3,8	4,2	4,2	4,1
8 oct	3,5	3,1	4,2	3,1	4,0	3,1	3,8	3,5	3,6	3,2	4,4	3,8	4,8	4,5
9 oct	3,4	3,2	4,2	4,2	4,0	3,3	3,9	3,5	3,4	3,1	4,0	3,9	4,4	4,3
10 oct	4,4	3,5	4,1	4,3	3,5	3,5	3,8	3,1	3,5	3,4	3,4	3,5	4,0	3,7
11 oct	3,7	3,9	3,3	3,7	3,8	4,0	3,9	3,6	3,6	3,1	3,2	3,5	4,1	4,2
12 oct	2,9	4,6	2,0	3,3	3,8	3,9	3,3	3,6	3,9	3,3	4,1	2,6	3,5	4,2

Continuación del apéndice 4.

13 oct	3,3	4,3	2,6	3,5	3,6	2,2	3,3	3,8	3,7	3,5	4,3	3,6	3,3	4,4
14 oct	2,6	4,6	3,7	3,3	4,1	2,3	2,2	3,3	3,1	3,6	4,3	3,2	3,9	4,5
15 oct	3,0	4,6	4,5	2,8	4,3	3,1	2,8	3,6	3,6	3,2	2,6	3,5	3,2	4,2
16 oct	2,0	4,3	4,5	1,7	4,2	2,8	3,4	3,5	3,7	2,8	3,0	3,6	3,9	2,8
17 oct	3,0	4,5	4,5	2,5	4,0	3,3	3,7	4,3	3,5	3,7	3,8	3,6	3,3	3,1
18 oct	3,0	4,5	4,6	2,4	2,8	3,6	4,1	4,1	3,7	3,6	3,4	3,4	3,7	3,2
19 oct	3,3	4,3	3,6	2,5	2,2	3,8	3,8	4,1	4,2	3,5	3,1	3,8	3,0	2,9
20 oct	3,4	3,9	3,4	2,2	3,5	3,4	2,4	3,1	3,5	4,3	4,5	3,5	3,4	3,9
21 oct	4,3	3,9	2,9	2,4	3,8	2,8	3,2	2,8	3,6	4,0	3,7	3,8	4,0	3,6
22 oct	3,7	3,7	4,5	2,7	4,2	3,5	2,1	2,7	3,8	4,2	3,7	2,7	3,7	3,8
23 oct	3,9	3,2	3,8	2,4	4,1	4,0	3,1	3,3	3,6	4,2	4,4	3,0	3,5	4,0
24 oct	2,7	3,3	2,0	2,4	3,7	3,3	2,7	3,0	3,5	2,4	4,4	3,2	2,9	4,2
25 oct	3,1	3,9	1,9	2,8	4,0	4,4	3,0	3,2	2,4	2,0	4,5	2,8	2,4	4,5
26 oct	3,4	4,2	3,0	3,5	4,4	4,7	3,6	3,3	2,9	2,6	2,0	3,6	2,0	4,0
27 oct	4,0	4,5	3,0	2,3	4,3	4,4	4,2	2,2	2,6	3,9	3,2	3,4	4,2	4,3
28 oct	3,4	2,9	3,5	2,3	4,0	3,7	4,6	3,6	2,8	4,0	3,9	3,1	2,1	3,1
29 oct	2,6	2,5	3,1	2,2	4,5	3,0	2,7	2,1	3,2	3,1	3,9	3,8	3,2	4,0
30 oct	2,6	3,7	3,1	1,8	4,5	3,4	2,5	3,1	3,6	2,7	4,7	4,0	3,6	3,0
31 oct	2,0	3,9	2,5	1,7	3,7	3,5	2,0	2,8	3,9	2,4	4,8	3,8	3,3	4,0
1 nov	1,7	2,0	2,7	1,9	2,8	3,0	2,6	2,8	3,8	2,1	4,2	3,0	3,2	4,4
2 nov	2,6	2,2	2,4	1,8	3,0	3,8	2,8	2,9	3,4	1,3	3,4	2,3	3,3	3,5
3 nov	2,0	2,1	1,8	2,8	2,7	2,8	3,2	2,7	2,2	2,6	3,3	2,5	3,3	3,5
4 nov	2,4	2,8	2,0	3,0	2,5	2,3	3,1	3,1	2,8	2,1	3,2	2,8	2,6	3,4
5 nov	3,4	2,8	1,4	3,0	2,1	2,2	2,6	2,2	3,1	2,7	3,4	2,0	2,9	3,5
6 nov	2,6	3,2	1,6	3,4	2,4	2,2	3,5	2,0	3,3	2,9	3,7	2,6	3,0	4,0
7 nov	2,7	2,8	2,1	3,3	2,5	2,2	2,6	2,0	2,2	2,9	3,4	2,4	2,8	3,7
8 nov	2,8	2,8	2,5	2,6	3,4	3,0	3,1	2,7	1,9	2,4	3,6	3,2	2,0	4,0
9 nov	2,5	3,8	2,9	3,3	2,9	2,5	3,7	2,2	1,9	2,6	2,6	3,1	2,8	3,8
10 nov	2,6	3,7	3,1	3,3	1,6	3,2	2,7	2,6	2,7	2,1	2,6	2,5	2,4	3,6
11 nov	2,2	3,5	2,9	3,7	1,7	3,3	2,4	3,1	2,5	3,7	3,1	2,5	1,8	3,0
12 nov	3,0	2,8	2,5	3,6	2,3	2,6	2,6	3,3	2,6	3,3	3,1	3,0	2,6	4,1
13 nov	3,2	3,8	1,4	3,7	2,6	3,2	3,2	2,5	2,6	2,7	2,8	3,3	2,0	3,6
14 nov	2,6	3,9	2,6	4,0	3,7	3,3	3,9	2,2	2,4	2,2	2,6	2,3	2,6	1,5
15 nov	3,3	3,9	1,8	3,3	3,7	4,3	4,1	2,5	2,6	2,1	2,8	3,4	2,5	2,2
16 nov	3,3	2,7	2,1	2,0	3,7	4,2	3,4	2,5	2,7	3,6	2,6	2,9	2,3	2,5
17 nov	1,8	2,0	3,6	1,5	2,5	3,3	2,7	2,8	3,3	3,9	3,5	2,3	2,8	2,7

Continuación del apéndice 4.

18 nov	2,3	2,2	3,4	1,4	2,8	2,4	3,2	2,7	3,4	1,6	3,9	2,6	3,2	2,6
19 nov	1,8	1,8	2,8	2,2	3,3	2,3	2,8	2,3	3,2	1,8	3,3	2,1	3,1	3,2
20 nov	2,2	1,9	2,6	2,1	3,6	2,6	3,1	3,1	3,3	2,0	2,7	2,0	1,7	2,4
21 nov	1,7	1,5	2,8	1,8	3,4	2,9	2,5	2,9	3,4	2,8	2,6	2,5	3,9	2,2
22 nov	1,6	2,0	3,8	1,5	3,6	3,4	3,6	2,1	3,1	2,9	2,5	3,0	3,5	2,4
23 nov	2,4	2,6	2,7	2,7	3,6	3,2	3,5	2,5	2,5	3,8	2,7	3,1	2,3	3,5
24 nov	3,6	3,1	3,5	2,1	3,4	2,6	3,0	1,2	2,2	4,0	2,7	2,1	2,1	4,3
25 nov	4,1	2,4	3,6	1,9	3,2	3,8	2,8	2,3	2,2	3,4	2,3	2,8	3,8	4,3
26 nov	3,7	2,8	3,3	2,6	2,1	4,0	3,9	3,0	3,4	2,0	3,1	2,4	3,5	4,0
27 nov	4,3	2,5	2,0	3,3	1,5	2,7	3,5	3,4	1,8	1,1	3,0	2,7	2,4	2,4
28 nov	4,3	2,7	2,1	3,5	2,9	2,7	1,4	1,3	1,6	1,7	2,7	4,2	3,2	2,6
29 nov	3,0	3,4	2,9	3,9	3,7	3,6	2,4	2,0	1,2	2,2	2,8	4,3	2,3	3,6
30 nov	2,4	3,8	2,4	3,9	3,9	3,6	2,3	2,4	2,2	2,6	3,0	4,3	1,3	4,0
1 dic	2,8	1,9	2,8	2,7	3,5	1,8	2,7	2,1	2,0	2,3	3,0	2,6	2,0	4,0
2 dic	2,5	1,8	3,0	1,5	4,1	1,8	3,0	2,7	3,3	1,8	3,4	3,2	2,0	3,9
3 dic	3,0	2,8	2,7	2,6	3,4	1,8	2,4	2,7	3,5	2,2	2,2	3,0	2,2	3,9
4 dic	3,7	1,9	2,8	3,3	3,4	2,5	3,2	2,8	3,8	2,8	1,4	4,0	2,9	3,2
5 dic	3,8	1,5	3,7	2,1	2,0	2,8	3,2	2,0	3,4	2,5	1,6	3,6	2,9	3,2
6 dic	2,4	2,4	3,6	2,7	2,4	1,5	3,1	2,7	3,4	2,0	2,1	3,6	2,6	3,2
7 dic	2,8	2,4	3,4	1,9	3,4	2,4	2,1	3,2	2,6	1,5	2,1	3,1	3,0	3,2
8 dic	2,8	1,7	3,2	2,6	3,4	3,3	2,2	3,4	2,2	1,7	2,3	3,2	3,0	3,7
9 dic	2,0	1,8	2,9	3,9	4,0	1,8	2,1	3,8	2,9	2,1	3,0	3,0	1,3	3,1
10 dic	2,1	2,2	2,9	3,9	3,7	2,6	2,0	3,6	2,4	1,5	3,0	2,5	1,3	2,8
11 dic	2,5	2,1	2,6	1,3	3,2	3,4	2,5	3,7	2,3	2,0	3,1	2,6	2,1	1,7
12 dic	2,5	2,2	2,9	1,5	3,2	3,3	2,7	2,0	2,3	2,3	3,4	2,8	2,3	2,8
13 dic	2,7	2,5	3,0	2,4	3,1	1,7	2,4	2,5	1,8	2,2	3,9	2,6	1,9	3,9
14 dic	3,4	2,4	2,6	3,7	3,4	1,6	2,5	2,8	3,1	2,4	3,8	2,7	3,7	3,5
15 dic	3,5	2,4	3,9	3,6	2,9	2,8	2,3	2,9	2,0	2,9	3,9	2,6	3,5	1,6
16 dic	3,2	2,1	2,5	2,3	2,5	3,7	2,2	3,2	1,5	2,9	3,9	2,7	2,5	1,4
17 dic	3,5	2,8	1,8	2,3	2,9	3,8	2,4	3,8	1,9	2,5	3,4	3,0	2,8	2,1
18 dic	3,1	1,9	2,4	2,7	2,0	3,5	2,1	3,1	2,1	2,3	2,5	3,6	2,4	3,2
19 dic	1,9	1,8	2,7	2,4	2,0	2,6	2,6	3,4	2,4	3,1	1,7	2,5	2,9	4,0
20 dic	2,6	2,2	3,3	3,1	1,6	3,1	3,7	3,4	3,2	2,4	2,0	2,3	2,9	3,8
21 dic	1,6	3,7	3,5	3,3	1,8	3,2	3,5	1,9	3,8	2,9	2,6	2,0	2,8	2,5
22 dic	2,3	3,7	3,7	2,3	2,3	2,7	3,5	1,3	3,6	3,7	3,6	2,6	3,0	3,1
23 dic	2,6	3,4	2,9	3,1	3,8	2,2	2,9	2,3	2,7	3,4	2,7	2,6	2,4	3,4

Continuación del apéndice 4.

24 dic	3,6	3,8	2,9	3,0	4,0	2,8	2,4	3,5	2,4	3,4	3,6	3,2	2,0	2,1
25 dic	3,0	2,3	3,0	2,9	2,9	2,7	2,0	4,1	2,1	1,7	3,1	3,1	2,3	2,3
26 dic	2,5	2,1	3,6	2,8	3,8	2,0	2,4	3,3	2,4	2,9	3,5	2,8	1,9	3,1
27 dic	3,1	1,5	3,5	2,9	3,7	2,1	2,6	3,0	2,2	3,4	3,9	2,2	2,4	3,9
28 dic	3,8	3,6	3,5	2,7	2,2	2,3	2,4	3,7	2,3	3,5	3,5	2,2	2,5	3,8
29 dic	3,9	3,6	2,6	2,1	2,3	3,6	3,2	2,9	2,3	3,2	3,2	2,0	2,1	3,2
30 dic	3,8	3,6	3,6	2,2	2,6	3,9	3,4	3,5	2,9	2,5	3,2	2,7	2,0	3,7
31 dic	3,7	3,0	3,1	2,5	3,1	4,0	2,7	2,9	2,3	2,2	3,3	3,2	2,8	3,7

Fuente: elaboración propia, con base a la ecuación 1.

Apéndice 5. Parámetros Calibrados en HEC-hms

Suebcuencia	Parametro	1999	2005	2010	2015	2018
Cahabon 1	Simple Surface - Initial Storage (%)	27,1	14,5	20,0	19,8	19,8
Cahabon 2		25,8	14,6	28,9	18,6	19,0
Cahabon 3		24,6	14,0	27,6	17,0	17,8
Cahabon 4		23,9	13,2	26,4	16,4	17,2
Cahabon 5		23,5	11,7	25,3	19,1	16,7
Cahabon 6		23,2	11,8	24,3	18,6	16,6
Cahabon 7		23,2	13,8	23,3	18,3	17,2
Laguna chichoj		25,0	14,4	22,5	22,2	20,9
Matanzas		25,5	17,7	21,8	20,5	22,6
Río Chicoy		20,9	19,3	21,6	22,2	24,8
Río Nestela		21,3	21,0	20,8	22,0	27,2
Río Tzunutz		21,3	8,2	19,6	21,4	29,9
Cahabon 1		Simple Surface - Max Storage (mm)	835,4	741,9	596,5	615,3
Cahabon 2	903,8		783,4	595,9	601,5	1085,9
Cahabon 3	949,7		816,4	861,3	577,1	1178,5
Cahabon 4	998,5		1001,7	854,4	811,1	1195,8
Cahabon 5	989,3		992,1	816,9	1500,0	1293,2
Cahabon 6	973,8		932,9	779,9	1484,8	1257,1
Cahabon 7	952,5		859,1	762,6	1361,7	1223,5
Laguna chichoj	925,6		780,7	739,0	1242,3	1124,0
Matanzas	893,4		657,9	710,0	1110,6	1457,4
Río Chicoy	852,9		827,0	667,1	979,0	1307,8
Río Nestela	770,7		690,0	611,5	789,5	1146,1
Río Tzunutz	515,2		545,7	551,8	608,6	962,0

Continuación del apéndice 5.

Cahabon 1	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration (hr)	5,4	5,6	6,1	6,3	5,6
Cahabon 2		5,5	4,8	5,4	5,0	4,6
Cahabon 3		25,5	38,8	40,8	38,8	37,4
Cahabon 4		10,6	7,7	9,0	8,7	8,7
Cahabon 5		16,1	12,5	15,4	14,9	15,4
Cahabon 6		9,4	6,4	7,4	10,4	7,4
Cahabon 7		6,8	6,9	7,3	9,7	7,3
Laguna chichoj		9,5	11,7	9,7	12,6	10,1
Matanzas		2,2	2,6	1,8	2,6	2,2
Río Chicoy	3,3	4,0	4,7	4,4	3,9	
Río Nestela	4,8	5,9	7,0	7,7	6,6	
Río Tzunutz	3,0	3,5	4,6	4,6	4,1	
T 0-1	Lag - Lag (min)	198,2	261,9	309,2	312,8	260,7
T 1-2		196,5	222,5	269,2	244,9	207,0
T 2-3		907,1	1768,4	2008,5	1863,8	1662,7
T 3-4		376,5	349,6	437,4	571,0	378,3
T 4-5		565,7	557,1	741,3	961,4	649,3
T 5-6		331,3	282,0	354,8	467,5	304,0
T 6-7		238,8	302,6	345,6	436,0	291,6
T 7-8		26,7	23,7	33,2	28,6	34,7
Cahabon 1	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient (hr)	5,3	5,7	6,9	8,5	5,9
Cahabon 2		5,2	5,6	6,9	8,3	5,9
Cahabon 3		5,2	5,5	6,8	8,1	5,9
Cahabon 4		5,1	5,4	6,7	8,0	5,9
Cahabon 5		5,1	5,3	6,6	7,8	5,9
Cahabon 6		5,1	5,2	6,6	7,6	5,9
Cahabon 7		5,0	5,1	6,5	7,4	5,8
Laguna chichoj		5,0	5,0	6,4	7,3	5,8
Matanzas		4,9	4,9	6,3	7,1	5,8
Río Chicoy		4,9	4,9	6,2	6,9	5,8
Río Nestela		4,8	4,8	6,2	6,7	5,7
Río Tzunutz		4,8	4,7	6,1	6,6	5,7
Cahabon 1		Abstracción inicial (mm)	48,3	34,2	43,4	36,7
Cahabon 2	39,2		39,1	47,9	53,4	48,8
Cahabon 3	105,5		30,9	44,7	46,4	40,1
Cahabon 4	32,3		48,5	58,1	55,9	48,2
Cahabon 5	42,3		48,3	52,7	49,9	45,4
Cahabon 6	50,3		76,7	98,4	88,7	92,4
Cahabon 7	67,5		51,1	78,1	75,4	79,4
Laguna chichoj	38,2		35,0	44,4	42,6	42,6
Matanzas	25,3		27,3	41,0	43,8	41,2
Río Chicoy	50,5		46,4	61,4	56,1	61,2
Río Nestela	84,9		79,1	106,6	72,4	72,0
Río Tzunutz	112,9		100,0	111,9	92,4	85,8

Continuación del apéndice 5.

Cahabon 1	Simple Canopy- inicial storage (%)	10,3	9,6	14,0	12,4	14,5
Cahabon 2		10,1	9,4	13,8	12,0	14,5
Cahabon 3		9,8	9,2	13,5	11,7	14,2
Cahabon 4		9,5	9,0	13,3	11,3	14,0
Cahabon 5		9,2	8,8	13,1	11,0	13,7
Cahabon 6		9,0	8,6	12,9	10,6	13,4
Cahabon 7		8,7	8,4	12,7	10,3	13,1
Laguna chichoj		8,4	8,1	12,5	9,9	12,9
Matanzas		8,2	7,9	12,3	9,6	12,7
Río Chicoy		7,9	7,7	12,1	9,2	12,5
Río Nestela	7,7	7,5	11,9	8,9	12,3	
Río Tzunutz	7,4	7,3	11,6	8,6	12,0	
Cahabon 1	Simple Canopy- max storage (mm)	71,8	71,5	114,3	82,9	117,0
Cahabon 2		69,0	69,6	112,2	79,9	113,7
Cahabon 3		109,8	67,7	110,1	76,9	110,3
Cahabon 4		105,5	65,8	108,0	73,9	106,8
Cahabon 5		101,2	64,0	105,8	71,0	103,2
Cahabon 6		96,9	62,1	103,7	68,2	99,3
Cahabon 7		92,6	60,3	101,6	65,4	95,2
Laguna chichoj		88,3	58,6	99,5	62,7	90,9
Matanzas		83,9	56,8	97,4	60,1	86,5
Río Chicoy		79,6	55,1	95,2	57,5	81,9
Río Nestela	75,3	53,4	93,1	54,9	76,9	
Río Tzunutz	53,2	51,7	51,2	52,4	53,9	
Cahabon 1	Curva Numero	55,8	84,9	-	87,5	-
Cahabon 2		53,8	62,2	-	77,6	-
Cahabon 3		35,3	75,6	-	76,5	-
Cahabon 4		46,7	57,5	-	71,0	-
Cahabon 5		39,8	48,8	-	69,7	-
Cahabon 6		37,2	35,6	-	55,7	-
Cahabon 7		47,0	36,0	-	55,8	-
Laguna chichoj		50,9	36,9	-	65,2	-
Matanzas		50,6	38,8	-	61,2	-
Río Chicoy		38,9	36,9	-	59,9	-
Río Nestela	50,3	35,5	-	58,1	-	
Río Tzunutz	46,1	39,4	-	55,5	-	

Fuente: elaboración propia, empleando Hec-hms.