



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

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO  
DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ  
PINULA, GUATEMALA**

**Luis Rodrigo Ramírez Reyes**

Asesorado por el MSc. Ing. Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO  
DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ  
PINULA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUIS RODRIGO RAMÍREZ REYES**

ASESORADO POR EL MSC. ING. JÉSER ESAÚ DE JESÚS NIJ PATZÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO AMBIENTAL**

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

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 Vladimir 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. Carlos Vinicio Godínez Miranda
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
EXAMINADORA	Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
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:

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO  
DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ  
PINULA, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de mayo de 2021.

A handwritten signature in black ink, enclosed in an oval shape. The signature is written in a cursive style and appears to read "Luis Rodrigo Ramírez Reyes".

**Luis Rodrigo Ramírez Reyes**

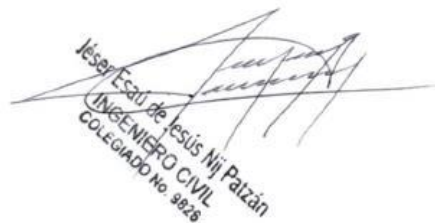
Pennsylvania. State College, 30 de agosto de 2022

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química Presente.  
Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he asesorado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **"IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA"**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, Luis Rodrigo Ramírez Reyes, quien se identifica con el registro académico 2016-02972 y con el CUI 3025 44011 0103.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán  
INGENIERO CIVIL  
COLEGIADO No. 9826

MSc. Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán  
Ingeniero civil  
Colegiado activo no. 9826  
Maestría en recursos hidráulicos, opción  
hidrología  
Asesor



Guatemala, 23 de febrero de 2023.  
Ref. EIQ.TG-IF.003.2023.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **087-2020**, 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: **Luis Rodrigo Ramírez Reyes**.  
Identificado con número de carné: **3025440110103**.  
Identificado con registro académico: **201602972**.  
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.  
En la modalidad: **TESIS (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:

### IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán, profesional de la Ingeniería Civil**

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"



Pablo Cesar A. Saravia Solares  
Ingeniero Industrial  
Colegiado 10,924

Pablo Cesar Aníbal Saravia Solares  
profesional de la Ingeniería Industrial  
Maestría en Recursos Hidráulicos,  
Gestión Integrada al Recursos Hídrico  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centralizadora de Actividades de  
Gestión de la Academia y de Impresión







LNG.DIRECTOR.087.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA**, presentado por: **Luis Rodrigo Ramírez Reyes**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Álvarez Mejía: M.I.Q., M.U.I.E.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, abril de 2023.

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

LNG.DECANATO.OI.366.2023

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: **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TEOCINTE, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA**, presentado por: **Luis Rodrigo Ramírez Reyes**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, abril de 2023

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser la razón de mi existir y mi historia. Porque sus planes son perfectos y lleva mi vida por el mejor camino.
- Mis padres** Luis Guillermo Ramírez y Evelyn Reyes, por su apoyo y amor incondicional en esta lucha diaria. Esto es para ustedes.
- Mis hermanos** Rocío, Jari, Fran, Haroldo y Santiago. Porque su apoyo y cariño siempre fueron un motor en mi vida diaria.
- Mis abuelos** Zoila Luz Porres, Haroldo Ramírez (+) y Nohemí García (+), por sus bendiciones y cariño incondicional.
- Mis tíos** Por ser parte de este logro.
- Mis primos** Por animarme cuando más lo necesitaba.
- Mis compañeros** Gerardo, Ale, Mafer, Juanma, Mijail, Anita, Karla, Diego. Por acompañarme durante mi trayecto universitario, por las palabras de ánimo y apoyo, por todos los momentos vividos juntos.

**Mis amigos de la iglesia**

Maco, Álex, Pablo, Wilson, Merlhy, Nathalie, Fabiola. Por su apoyo incondicional, sus oraciones y sus palabras de ánimo.

**Mis amigos de Petén**

A la familia Cuéllar y todas las amistades que formé. Por convertirse en mi segunda familia durante mi tiempo en Petén.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme el tesoro invaluable del conocimiento que me permitió formarme como persona y profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme los conocimientos necesarios para alcanzar mi título profesional.
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero Jéser Nij, por todo su apoyo, amistad, consejos y guía a lo largo de este proceso.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Ciclo hidrológico .....	5
2.1.1. Evaporación.....	6
2.1.2. Precipitación .....	6
2.1.3. Transpiración .....	7
2.1.4. Evapotranspiración .....	7
2.1.5. Intercepción .....	8
2.1.6. Infiltración .....	8
2.1.7. Escorrentía .....	8
2.2. El ciclo hidrológico como un sistema .....	9
2.3. Zonas de recarga hídrica.....	10
2.4. Clasificación de zonas de recarga hídrica .....	11
2.4.1. Zonas de recarga hídrica superficial.....	11
2.4.2. Zonas de recarga hídrica subsuperficial .....	12
2.4.3. Zonas de recarga hídrica subterránea.....	12

2.5.	Cuenca hidrológica.....	12
2.5.1.	Partes de una cuenca .....	13
2.5.1.1.	Cuenca alta .....	13
2.5.1.2.	Cuenca media .....	14
2.5.1.3.	Cuenca baja .....	14
2.5.2.	División de una cuenca hidrográfica.....	15
2.6.	Factores que intervienen en el proceso de recarga hídrica natural .....	16
2.6.1.	Factores climáticos.....	16
2.6.1.1.	Precipitación pluvial.....	16
2.6.1.2.	Precipitación efectiva .....	17
2.6.1.3.	Evapotranspiración.....	18
2.6.2.	Suelo .....	19
2.6.2.1.	Textura del suelo.....	19
2.6.2.2.	Densidad aparente .....	20
2.6.2.3.	Infiltración .....	21
2.6.3.	Topografía.....	22
2.6.4.	Cobertura vegetal.....	22
2.6.5.	Geología.....	23
2.7.	Balance hídrico .....	24
2.8.	Sistemas de información geográfica .....	25
2.8.1.	Interpolación.....	25
2.8.1.1.	Interpolación por distancia inversa ponderada (IDW).....	26
2.8.1.2.	Interpolación por Spline.....	26
2.8.1.3.	Interpolación por Kriging.....	27
2.9.	Vulnerabilidad espacial a la contaminación.....	27
2.9.1.	Metodología DRASTIC.....	27
2.9.2.	Metodología GOD .....	28

3.	METODOLOGIA.....	29
3.1.	Variables.....	29
3.1.1.	Variables independientes .....	29
3.1.2.	Variables dependientes .....	30
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	30
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	33
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	33
3.4.1.	Pruebas de infiltración .....	33
3.4.2.	Análisis de datos y elaboración de mapas de clasificación de zonas de recarga hídrica .....	33
3.5.	Técnica.....	34
3.5.1.	Técnica cualitativa .....	34
3.5.2.	Técnica cuantitativa .....	34
3.5.2.1.	Cálculo de la recarga hídrica natural ...	35
3.5.2.1.1.	Cálculo del coeficiente de infiltración de los suelos mediante el método de Porchet .....	35
3.5.2.1.2.	Cálculo de la precipitación media de la microcuenca por el método promedio o media aritmética .....	36
3.5.2.1.3.	Determinación de la evapotranspiración real y potencial .....	37
3.5.2.1.4.	Cálculo de la intercepción .....	40

	3.5.2.1.5.	Cálculo de la infiltración.....	41
	3.5.2.1.6.	Cálculo de la escorrentía superficial ...	44
	3.5.2.1.7.	Cálculo de la recarga hídrica natural .....	44
	3.5.2.2.	Balance hídrico de suelos de la microcuenca del río Teocinte .....	45
3.6.		Recolección, ordenamiento y procesamiento de la información.....	45
	3.6.1.	Recolección de información climática .....	46
	3.6.2.	Recolección de información de pruebas de infiltración .....	46
	3.6.3.	Recopilación de datos para el cálculo de la recarga hídrica .....	48
3.7.		Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	50
	3.7.1.	Recarga hídrica del área de estudio.....	50
	3.7.2.	Mapa de recarga hídrica de la microcuenca de estudio.....	50
	3.7.2.1.	Mapa de texturas de suelo .....	51
	3.7.2.2.	Mapa de usos del suelo .....	52
	3.7.2.3.	Mapa de unidades de muestreo .....	53
	3.7.2.4.	Mapa de pendientes.....	54
	3.7.2.5.	Mapa de unidades de mapeo .....	55
	3.7.2.6.	Identificación de zonas de recarga hídrica.....	56
	3.7.3.	Delimitación de perímetros de protección .....	57

3.7.3.1.	Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea...	57
3.7.3.1.1.	Espesor de la zona no saturada o profundidad (D).....	58
3.7.3.1.2.	Recarga neta anual (R) .....	61
3.7.3.1.3.	Litología de la zona no saturada (A).....	63
3.7.3.1.4.	Suelo vegetal (S) .....	65
3.7.3.2.	Evaluación del índice de las presiones .....	67
3.7.3.3.	Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.....	69
3.7.3.4.	Clasificación de perímetros de protección .....	70
3.8.	Análisis estadístico .....	71
3.8.1.	Medidas de centro .....	71
3.8.1.1.	Media muestral .....	71
3.8.2.	Medidas de variabilidad .....	71
3.8.2.1.	Varianza de una muestra.....	72
3.8.2.2.	Desviación muestral estándar.....	72
3.8.3.	Análisis de máximos y mínimos.....	72
3.9.	Plan de análisis de los resultados .....	73
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables .....	73
3.9.2.	Programas a utilizar para el análisis de datos .....	73



4.	RESULTADOS.....	75
4.1.	Cuantificación de la recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte .....	75
4.1.1.	Información climática.....	75
4.1.2.	Cálculo de la infiltración básica .....	76
4.1.3.	Características físicas de los suelos presentes en la microcuenca del río Teocinte.....	77
4.1.4.	Evapotranspiración potencial .....	77
4.2.	Recarga hídrica natural .....	78
4.3.	Clasificación de zonas de recarga hídrica .....	79
4.4.	Balance hídrico de suelos .....	80
4.5.	Mapa de zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte .....	81
4.6.	Delimitación de los perímetros de protección de la microcuenca del río Teocinte .....	82
4.6.1.	Vulnerabilidad espacial a la contaminación utilizando el método DRASTIC reducido .....	82
4.6.2.	Delimitación de perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte .....	84
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	85
5.1.	Cuantificación de la recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte .....	85
5.1.1.	Información climática.....	85
5.1.2.	Cálculo de la infiltración básica .....	86
5.1.3.	Características físicas de los suelos muestreados.....	86

5.2.	Recarga hídrica natural y clasificación de zonas de recarga hídrica.....	86
5.3.	Balance hídrico de suelos.....	88
5.4.	Perímetros de protección.....	90
5.4.1.	Distribución espacial a la vulnerabilidad por medio del índice DRASTIC reducido .....	90
5.4.2.	Delimitación de perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte.....	92
CONCLUSIONES .....		95
RECOMENDACIONES .....		97
REFERENCIAS .....		99
APÉNDICE.....		103
ANEXOS.....		151



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Ciclo del agua .....	5
2.	Representación del ciclo hidrológico como un sistema .....	10
3.	Partes de una cuenca hidrográfica.....	14
4.	División de una cuenca hidrográfica.....	15
5.	Diagrama textural de la USDA .....	19
6.	Interpolación IDW.....	26
7.	Mapa de ubicación de la microcuenca del río Teocinte.....	32
8.	Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración.....	48
9.	Mapa de texturas de suelos de la microcuenca del río Teocinte.....	52
10.	Mapa de uso del suelo dentro de la microcuenca del río Teocinte .....	53
11.	Mapa de unidades de muestreo .....	54
12.	Mapa de clasificación de pendientes de la microcuenca del río Teocinte .....	55
13.	Mapa de unidades de mapeo.....	56
14.	Mapa de ubicación de pozos muestreados .....	59
15.	Mapa de profundidad .....	61
16.	Mapa de recarga neta del acuífero según DRASTIC .....	63
17.	Mapa de litología de la zona no saturada según DRASTIC .....	65
18.	Mapa de suelo vegetal según DRASTIC.....	67
19.	Índice de las presiones de la microcuenca del río Teocinte .....	69
20.	Mapa de zonas de recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte .....	82

21.	Distribución espacial de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Teocinte.....	83
22.	Perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica y sus restricciones de la microcuenca del río Teocinte .....	84

## TABLAS

I.	Ubicación geográfica de punto de aforo de la microcuenca del río Teocinte .....	31
II.	Criterios para tomar en cuenta para el cálculo de las constantes de humedad.....	39
III.	Criterios a tomar en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración real.....	40
IV.	Criterios a tomar en cuenta para el cálculo de la interceptación.....	41
V.	Criterios para definir el coeficiente de infiltración.....	42
VI.	Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente .....	42
VII.	Componentes del coeficiente de infiltración por cobertura vegetal .....	43
VIII.	Criterios para definir el coeficiente de infiltración por textura.....	44
IX.	Clasificación de unidades de muestreo de la microcuenca del río Teocinte .....	46
X.	Ubicación de pruebas de infiltración .....	47
XI.	Clasificación de unidades de mapeo de la microcuenca del río Teocinte .....	49
XII.	Textura de suelos presentes en la microcuenca del río Teocinte .....	51
XIII.	Rangos, valores y clases de vulnerabilidad aplicando el método Drastic reducido .....	58
XIV.	Valor DRASTIC asignado a cada rango de profundidad del acuífero (D).....	60
XV.	Valor DRASTIC asignado a la recarga neta (R) .....	62

XVI.	Valor DRASTIC asignado a la litología de la zona no saturada (A) .....	64
XVII.	Valor DRASTIC asignado a la litología de la zona no saturada (A) .....	66
XVIII.	Resumen de presiones y su intensidad de presión en la microcuenca del río Teocinte. Índice IP .....	68
XIX.	Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas .....	70
XX.	Perímetros de protección y sus restricciones.....	70
XXI.	Clasificación de las zonas de recarga hídrica en función del volumen de recarga hídrica natural anual .....	73
XXII.	Precipitación mensual (mm) de la microcuenca del río Teocinte .....	75
XXIII.	Temperatura promedio mensual (°C) de la microcuenca del río Teocinte .....	76
XXIV.	Infiltración básica del suelo por unidad de mapeo de la microcuenca del río Teocinte .....	76
XXV.	Constantes de humedad y tipo de textura de las unidades de muestreo de la microcuenca del río Teocinte.....	77
XXVI.	Evapotranspiración potencial de la microcuenca del río Teocinte.....	78
XXVII.	Recarga hídrica natural por unidad de mapeo de la microcuenca del río Teocinte .....	79
XXVIII.	Clasificación de las zonas de recarga hídrica natural de la microcuenca del Río Teocinte.....	80
XXIX.	Balance hídrico de suelos de la microcuenca del río Teocinte.....	81



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Ar</b>	Arcilla
<b>A</b>	Área
<b>AF</b>	Arena franca
<b>S</b>	Brillo solar
<b>fo</b>	Capacidad de infiltración
<b>fp</b>	Capacidad inicial
<b>C2</b>	Coeficiente de humedad al final de mes con ETPR
<b>C1</b>	Coeficiente de humedad al final de mes sin ETP
<b>Ci</b>	Coeficiente de infiltración
<b>Cfo</b>	Coeficiente de intercepción del follaje
<b>Kp</b>	Fracción de infiltración por la pendiente
<b>Kfc</b>	Fracción de infiltración por la textura del suelo
<b>Kv</b>	Fracción de infiltración por la vegetación
<b>F</b>	Franco
<b>FArA</b>	Franco arcilla arenosa
<b>FAr</b>	Franco arcilloso
<b>FA</b>	Franco arenoso
<b>Hsi</b>	Humedad del suelo al iniciar el mes
<b>HD</b>	Humedad disponible
<b>HR</b>	Humedad relativa
<b>IP</b>	Índice de las presiones
<b>RI</b>	Índice de riesgo
<b>mm</b>	Milímetros



<b>Pi</b>	Precipitación infiltrada
<b>Pm</b>	Precipitación media
<b>P</b>	Precipitación mensual
<b>Rh</b>	Recarga hídrica potencial del acuífero
<b>Ret</b>	Retención debida al follaje de la vegetación
<b>SIG</b>	Sistema de información geográfica
<b>T</b>	Temperatura
<b>V</b>	Volumen de recarga

## GLOSARIO

<b>DEM</b>	Modelo de elevación digital.
<b>ESC</b>	Escorrentía superficial.
<b>ETP</b>	Evapotranspiración potencial.
<b>ETR</b>	Evapotranspiración real.
<b>MAGA</b>	Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación.
<b>PMP</b>	Punto de marchitez permanente.
<b>QGIS</b>	Software de Información Geográfica Quantum GIS.
<b>RMM</b>	Radiación solar extraterrestre.
<b>RSM</b>	Radiación solar.
<b>RSM</b>	Radiación solar, incidente mensual.
<b>TMF</b>	Temperatura media mensual en grados °F.



## RESUMEN

La clasificación de zonas de recarga hídrica conlleva estudios técnicos y científicos, dado que la identificación de estas forma parte del estudio del ciclo hidrológico, para mantener el abastecimiento de los acuíferos de manera natural.

La identificación de zonas de recarga hídrica tiene como objetivo brindar una herramienta que ayude a reducir el deterioro y disminución de los niveles de las aguas subterráneas, debido al mal uso del suelo, al propiciar protección especial a las zonas que forman parte de este proceso natural de recarga.

El método de balance hídrico de suelos a utilizar, desarrollado por Schosinsky en 2007, consiste en la consideración de variables que influyen de forma directa en la recarga de los acuíferos, aplicada en la microcuenca del río Teocinte, municipio de San José Pinula, Guatemala. Las variables que se tomarán en cuenta son: climáticas, topográficas, geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas.

San José Pinula es un municipio con un incremento poblacional acelerado durante los últimos años, lo cual ha propiciado la impermeabilización de los suelos debido a la creación de centros urbanos en áreas importantes para el proceso de la recarga hídrica de los acuíferos.

Por medio del uso de los sistemas de información geográfica como herramienta, se obtuvieron mapas de clasificación e identificación de las zonas

de recarga hídrica, utilizando criterios de clasificación de los aspectos mencionados anteriormente.

Al tener definidas las zonas de recarga hídrica de la microcuenca de estudio se procedió a definir perímetros de protección óptimos para las mismas, utilizando como método propuesto el denominado índice RI (Risk Index) (Jiménez-Madrid *et al.*, 2013), que evalúa el riesgo de la contaminación de aguas subterráneas mediante un producto de matriz de doble entrada entre valores de vulnerabilidad intrínseca, que se obtuvo por medio del método DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002) y la intensidad de las presiones y riesgos ocasionados por actividades antropogénicas en la masa de agua subterránea.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Identificar las zonas de recarga hídrica natural, mediante un balance hídrico de suelos en la microcuenca del río Teocinte, San José Pinula, Guatemala, durante el periodo comprendido entre los años 2016 y 2020.

### **Específicos**

1. Describir y analizar las principales características de las zonas de recarga hídrica a delimitar, dentro de la microcuenca de estudio, utilizando como parámetros las variables climáticas, topográficas, geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas.
2. Estimar la recarga hídrica potencial que posee la microcuenca del río Teocinte, mediante un balance hídrico de suelos analizando variables climáticas, topográficas, geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas.
3. Clasificar las zonas potenciales de recarga hídrica dentro de la microcuenca de estudio, para su clasificación en baja, moderada, alta o muy alta, en función del potencial de recarga calculado.
4. Definir los perímetros óptimos para la protección de las zonas de recarga hídrica identificadas.

# HIPÓTESIS

## **Hipótesis nula (Ho)**

Ho<sub>1</sub>: es posible identificar las zonas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Teocinte, municipio de San José Pinula, Guatemala, mediante un balance hídrico de suelos, analizando variables climáticas, topográficas, geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas, haciendo uso de la metodología propuesta por Schosinsky, utilizando polígonos de características similares que favorecen la infiltración para la clasificación de áreas de estudio de las variables descritas anteriormente.

## **Hipótesis alternativa (Ha)**

Hi<sub>1</sub>: no es posible identificar las zonas de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Teocinte, municipio de San José Pinula, Guatemala, mediante un balance hídrico de suelos, analizando variables climáticas, topográficas, geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas, haciendo uso de la metodología propuesta por Schosinsky, utilizando polígonos que favorecen la infiltración similar para la clasificación de áreas de estudio de las variables descritas anteriormente.

## INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país que cuenta con vastos recursos hídricos y con una oferta superficial y subterránea de agua adecuada, pero con una gestión integrada muy pobre. Actualmente no existe una ley de aguas que regule el aprovechamiento del recurso hídrico. Si las instituciones públicas y municipalidades entablan una relación de coordinación y fortalecimiento de áreas de carácter técnico y científico para la generación, sistematización y evaluación de información que sea de utilidad en la adecuada planificación del aprovechamiento del agua, se podrá asegurar el mejoramiento y conservación del recurso hídrico a largo plazo (Basterrechea y Noriega, 2019).

Actualmente, la demanda total del recurso hídrico proveniente de la explotación de acuíferos de la región metropolitana de Guatemala es de alrededor de 502.3 millones  $m^3$  anuales, y la recarga disponible es de alrededor de 139.8 millones de  $m^3$ , es decir que se tiene un déficit, en cuanto al régimen hidrológico se refiere, de 362.5 millones de  $m^3$  de agua (Funcagua, 2018).

El presente trabajo de investigación, a nivel de pregrado, busca aplicar el método de balance hídrico de suelos para la identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río Teocinte, del municipio de San José Pinula, Guatemala, como una herramienta que permita el apoyo de planes para la conservación de áreas prioritarias para los procesos naturales de recarga de los cuerpos de agua.

El método del balance hídrico de suelos, desarrollado por Schosinsky en 2007, se basa en un principio fundamental: la conservación de la materia. Es



decir que el agua proveniente de las precipitaciones, y que entra al suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas se deben a la infiltración del agua hacia el suelo, y el flujo de salida se debe a la descarga de los acuíferos más la evapotranspiración que produce la vegetación de la microcuenca de estudio (Schosinsky, 2006).

Para la aplicación del método del balance hídrico de suelos en la microcuenca de estudio se analizarán variables que intervienen de forma directa en la recarga de los acuíferos. Las variables de estudio son: climáticas, topográficas, geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas (INAB, 2003).

Para la identificación de las zonas de recarga hídrica se tuvo una fase de recolección de información climática, topográfica, geológica y de vegetación de la zona de estudio por medio bases de datos de Insivumeh, MARN, MAGA, IGN, entre otros, que sirvieron para definir las zonas de muestreo de suelos en la posterior fase de campo.

La fase de campo consistió en el muestreo y recolección de datos para realizar el balance hídrico de suelos, que incluye pruebas de infiltración en las zonas de muestreo, para el cálculo de la infiltración base, y la recopilación y ubicación de los pozos municipales que se encuentran dentro y en los alrededores de la zona de estudio.

## 1. ANTECEDENTES

El cálculo del potencial de recarga hídrica que posee una cuenca, así como la identificación y clasificación de zonas potenciales de recarga, es un procedimiento que se puede llevar a cabo por medio de distintas metodologías. Se han realizado estudios relacionados con la identificación de zonas de recarga hídrica natural, utilizando distintos métodos que pueden incluir el uso de cálculos climatológicos, hidrológicos y apoyándose en el uso de los sistemas de información geográfica o softwares de modelación hidrológica. Entre los estudios destacados en el tema de referencia, se pueden mencionar:

En la Universidad de Antioquía, Colombia, se realizó el trabajo de investigación denominado *Infiltración potencial y morfometría en la Cuenca Arroyo Grande, Sucre Colombia*, en el que se presenta un estudio de la capacidad de infiltración potencial considerando los aspectos geomorfológicos en la cuenca Arroyo Grande, Sucre, Colombia. Para estimar la infiltración en la cuenca de estudio, se utilizó el método del número de curva, desarrollado por el Sistema de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) para el análisis de los datos (Domínguez-Pérez y Mercado-Fernández, 2020).

En la Universidad Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil, se realizó la investigación *Effective hydraulic conductivity and its relationship with the other attributes of Cerrado solils*. El objetivo de este estudio fue determinar la conductividad hidráulica efectiva de seis áreas ubicadas en la región del Cerrado de Mato Grosso, Brasil, e identificar atributos físicos de suelos con potencial para predecir la conductividad hidráulica efectiva. Las pruebas para

determinar la conductividad hidráulica efectiva se realizaron en seis áreas, abarcando las clases texturales arena, franco arenoso y arcilla, y los siguientes usos: pasto, cerrado y agricultura. Se determinaron el tamaño de partícula, el fraccionamiento de arena, el contenido de carbono total, el grado de floculación de la arcilla, la densidad aparente, la macroporosidad, la microporosidad, el diámetro de peso medio, el diámetro geométrico medio y el índice de estabilidad de los agregados.

A partir de estos datos se realizaron análisis estadísticos de contrastes, mediante la prueba de Kruskal-Wallis, y se determinó el coeficiente de correlación de Pearson simple entre variables. Los valores promedio de conductividad hidráulica efectiva para las áreas de pasto, agricultura y Cerrado fueron 95.73, 27.83 y 48.31 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente (Bocuti *et al.*, 2020).

En la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, se realizó el trabajo de investigación *Vulnerabilidad intrínseca del acuífero del valle de Chimaltenango, altiplano central de Guatemala. Impactos preliminares de su gestión integrada*, en el que se midió la vulnerabilidad de un acuífero por medio del método GOD, analizando variables hidrogeológicas del valle, así como el potencial hídrico subterráneo, obteniendo como resultados un coeficiente de almacenamiento entre 0.01 y 0.02 para el valle de Chimaltenango, lo que indicó que es un acuífero libre o freático con producciones de 95 a 115 L/s (Orozco, 2011).

En el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, se realizó el estudio *Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos*, cuyo objetivo fue evaluar el impacto de sistemas silvopastoriles sobre el recurso hídrico en zonas de recarga de la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. En el desarrollo de la

investigación se evaluaron pasturas nativas sobrepastoreadas (PD), pasturas nativas con árboles (PNA), pasturas mejoradas con árboles (PMA) y un bosque secundario intervenido (BSI). Así se determinó que los bosques secundarios intervenidos presentaron el mayor porcentaje de infiltración, mientras que las pasturas nativas sobrepastoreadas presentaron el sistema con menor porcentaje de infiltración de agua (Ríos *et al.*, 2008).

La Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, desarrolló la publicación científica *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*, el cual es un método de análisis de datos de bandas de pluviógrafos, tomando en cuenta aspectos relacionados con la precipitación efectiva, cobertura vegetal, pendiente, velocidad de infiltración, tipos de suelo, entre otros aspectos para calcular la recarga potencial al acuífero de estudio, generando un error de recarga menor al 80 % (Schosinsky, 2006).

Se desarrolló un método para la estimación de recarga en los acuíferos llamado *Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos* en el Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Málaga, España, en el que se relacionan las variables de altitud, pendiente, litología, áreas de absorción-infiltración preferencial y suelo (llamado método APLIS), en el que se asignó a cada variable mencionada un valor entre 1 (influencia más baja) y 10 (influencia más alta) y se han almacenado en un SIG. Este método es especialmente aplicable en acuíferos carbonáticos de las cordilleras alpinas perimediterráneas (Andreo *et al.*, 2004).

Con la información recabada a través de los antecedentes referente al proceso de recarga hídrica natural, se busca replicar el método de balance hídrico de suelos, utilizando información de variables climáticas, topográficas,

geológicas, edáficas, vegetativas e hidrológicas de la microcuenca de estudio. Estas variables fueron obtenidas en campo y analizadas por medio de los sistemas de información geográfica y herramientas de cálculo para realizar una identificación de zonas de recarga hídrica, clasificándolas de acuerdo al potencial de recarga obtenido.

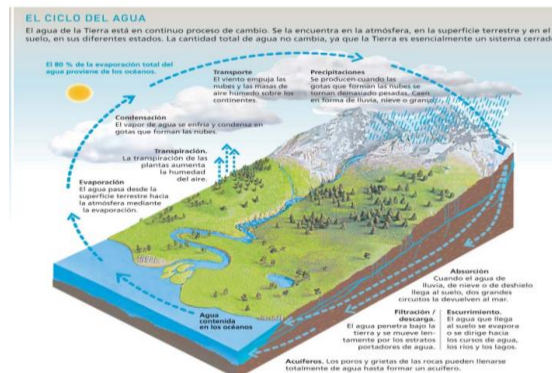
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Ciclo hidrológico

La hidrología comienza su estudio desde la percepción del ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico, conocido también como ciclo del agua, es el proceso de transformación y circulación del agua en la tierra. El ciclo hidrológico consiste en el traslado del agua de un lugar a otro, cambiando de estado físico debido a la influencia de la energía solar y la gravedad.

El ciclo del agua se puede definir como un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, es decir, en constante actividad respecto al cambio de fases en el agua presente en el ambiente (Ordóñez, 2011).

Figura 1. Ciclo del agua



Fuente: Vera y Camilloni (2010). *Ciencias naturales. El ciclo del agua*. Consultado el 18 de marzo de 2021. Recuperado de <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002315.pdf>.

### **2.1.1. Evaporación**

Consiste en la transformación del agua en estado líquido a vapor, elevando de esta manera el agua hacia la atmósfera. El agua evaporada normalmente proviene de las aguas continentales, tales como lagos, ríos, humedales, áreas impermeables, suelos y follaje vegetal del océano. Alrededor del 80 % de la evaporación total proviene de los océanos. La tasa de evaporación aumenta a medida que el ambiente es más caliente (Ordóñez, 2011)

### **2.1.2. Precipitación**

Al disminuir la temperatura en el ambiente, o al producirse cambios en la presión atmosférica, se presenta la precipitación. Este proceso puede definirse como el transporte del agua en sus fases líquida y/o sólida (en forma de lluvia, nieve, granizo, rocío, entre otras) desde la atmósfera hasta la superficie terrestre. La precipitación es precedida por la condensación del vapor de agua atmosférico al producirse un fenómeno denominado saturación, que es el grado en que una masa de aire tiene agua dentro de su composición porcentual. Al alcanzarse el grado máximo de saturación en una determinada masa de aire, el vapor de agua condensa en gotas de agua líquida (Aparicio, 1997).

Los distintos tipos de precipitación que se pueden encontrar son: precipitación convectiva, precipitación orográfica y precipitación frontal. Estos dependen de los procesos termodinámicos que ocurren en el ambiente y dan lugar a procesos de precipitación variados (Ordóñez, 2011).

### **2.1.3. Transpiración**

Un porcentaje del agua presente en el ambiente está contenido dentro de las plantas. La vaporización del agua contenida en los tejidos de la vegetación de la zona de estudio y el transporte del mismo vapor hacia la atmósfera se conocen como transpiración. Este proceso ocurre en las estomas de las plantas, que son pequeñas aberturas ubicadas en la superficie de las hojas, por donde también se produce el intercambio de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ), vitales para el proceso de fotosíntesis y respiración (Chow, 1995).

### **2.1.4. Evapotranspiración**

La evaporación y transpiración son procesos que ocurren al mismo tiempo, por lo que la evapotranspiración se ha definido como la combinación de estos fenómenos presentes en el ciclo del agua. La tasa de evapotranspiración potencial depende del suministro de la energía recibida a través de la radiación solar, la temperatura del ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento.

El viento desplaza masas de aire saturadas, reemplazándolas por aire seco, por lo que se crea un gradiente de humedad, evaporando agua de la superficie y de la vegetación presente en la zona. Esta tasa depende del tipo de vegetación presente y es la tasa máxima a la que puede evapotranspirar una planta debido a condiciones climáticas óptimas. Para balances hidrológicos se utiliza la evapotranspiración real, que es inferior a la potencial, esta ocurre cuando se reduce el almacenamiento de agua en el suelo (Velásquez y Chang, 1992).



### **2.1.5. Intercepción**

La intercepción es agua proveniente de la precipitación, pero que no llega nunca al suelo debido a la presencia de plantas que retienen un considerable porcentaje de agua en su follaje. Esta agua se evapora directamente a la atmósfera. La lámina de agua interceptada puede variar de acuerdo con la biomasa vegetal del lugar de estudio. Un área con cobertura boscosa intercepta una cantidad de agua mayor que una sabana con baja cobertura vegetativa (Ordóñez, 2011).

### **2.1.6. Infiltración**

El agua proveniente de la precipitación y que no ha sido interceptada por los follajes de la vegetación penetra en el suelo. El tipo de suelo y sus características, como la textura y estructura del mismo, determinan la capacidad o tasa de infiltración de la zona de estudio. La tasa de infiltración disminuye a medida que el grado de saturación del suelo aumenta, tendiendo a un valor constante, también conocido como infiltración básica del suelo (Faustino, 2006).

### **2.1.7. Escorrentía**

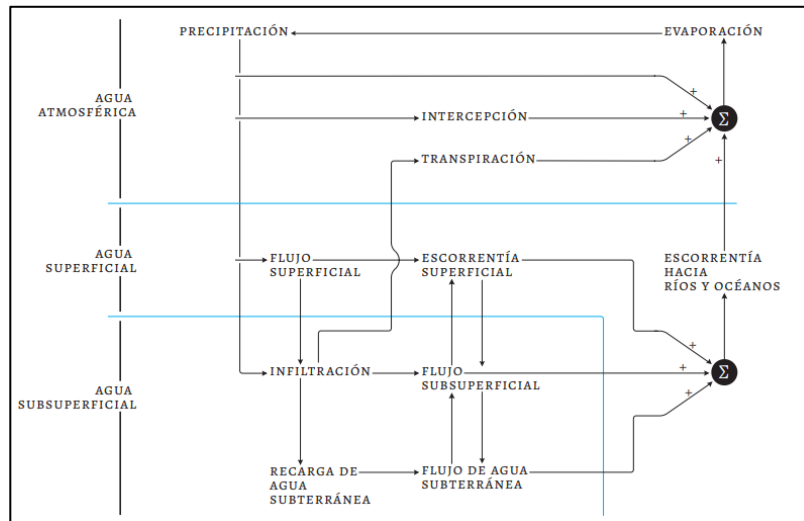
Es el agua que alimenta a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes de una cuenca. La cantidad de agua de escorrentía está condicionada por factores meteorológicos, geográficos, biológicos e hidrogeológicos. Está formada por la escorrentía superficial, flujo subsuperficial y el flujo de aguas subterráneas que alimentan a cuerpos de agua dentro de la cuenca (si la cuenca es endorreica) o terminan en el océano (cuenca exorreica) (Núñez, 2001).

## **2.2. El ciclo hidrológico como un sistema**

Un sistema es definido como un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo más complejo (Chow, 1995). El ciclo hidrológico puede ser tratado como un sistema en el que sus componentes son las entradas y salidas de agua, tales como la precipitación, evaporación, evapotranspiración, intercepción y las demás fases del ciclo hidrológico. Estos componentes pueden ser agrupados como subsistemas del ciclo total. En el análisis del sistema total se deben agrupar los subsistemas (las fases del ciclo hidrológico), analizarse separadamente y combinarse los resultados de acuerdo con las interacciones entre los subsistemas.

En la figura 2 se divide el ciclo hidrológico en tres subsistemas: el sistema de agua atmosférico que contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el sistema de agua superficial que contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea y escorrentía hacia ríos y océanos, y el sistema de agua subsuperficial que contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea (Chow, 1995).

Figura 2. Representación del ciclo hidrológico como un sistema



Fuente: Chow *et al.* (1995). *Hidrología aplicada*.

### 2.3. Zonas de recarga hídrica

La recarga hídrica es el proceso por medio del cual se incorpora agua proveniente de la zona exterior que limita a un acuífero. Existen varias fuentes de recarga que van desde la infiltración procedente de la precipitación, que representa el mayor flujo de ingreso, hasta la transferencia de agua desde otro acuífero (INAB, 2005).

Desde el punto de vista hidrológico, en lo concerniente a las aguas subterráneas los fenómenos de importancia son la recarga y descarga de los acuíferos. Los acuíferos se recargan principalmente de forma natural por el agua proveniente de la precipitación que se infiltra en el suelo y las rocas. Siguiendo el curso del ciclo hidrológico, el agua suele entrar a los acuíferos en las zonas de recarga hídrica, atravesando de forma lenta el manto freático y

termina saliendo por las zonas de descarga, formando cuerpos de agua superficiales (Faustino, 2006).

La recarga hídrica natural está limitada a la capacidad de almacenamiento del acuífero, de tal forma que, al llegar al límite de la recarga, el volumen de entrada de agua pasa a otra área, que puede ser superficie terrestre, río, lago, mar o incluso otro acuífero. La cantidad de recarga está limitada por la extensión del área de captación o de entrada. La precipitación, la infiltración y el escurrimiento son factores que intervienen y limitan la entrada de agua al acuífero (Faustino, 2006).

En las zonas en las que se producen volúmenes de precipitación altos y de evapotranspiración baja, las tasas de recarga son altas. Caso contrario ocurre en zonas áridas o con clima cálido. Sin embargo, la tasa de recarga de los acuíferos no depende completamente de las condiciones climáticas, sino de la velocidad de infiltración. El agua proveniente de la precipitación que se infiltra en un periodo de tiempo corto es menos probable que entre en el proceso de escurrimiento superficial y de la evaporación (Losilla, 1986).

## **2.4. Clasificación de zonas de recarga hídrica**

De acuerdo con Faustino (2006), según el movimiento del agua en el suelo, subsuelo y el manto rocoso se pueden clasificar las zonas de recarga hídrica en:

### **2.4.1. Zonas de recarga hídrica superficial**

Es la zona que se humedece luego del proceso de precipitación, produciendo escorrentía superficial, que está condicionada por factores

dependientes del suelo, tales como el relieve o el grado de saturación que este presenta. Las zonas de recarga hídrica superficial se encuentran prácticamente en toda la cuenca hidrográfica, sin tomar en cuenta las zonas totalmente impermeables.

#### **2.4.2. Zonas de recarga hídrica subsuperficial**

Son las zonas de la cuenca en que los suelos tienen capacidad de retención de agua considerable, o el almacenamiento superficial se produce sobre una capa impermeable que produce un flujo superficial horizontal, llevándolo aguas abajo del sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, incluso luego de que la precipitación ya haya ocurrido y en épocas secas por el agua proveniente de los bosques. El caudal producido por las zonas de recarga subsuperficial se realiza en el cauce principal del río y es conocido como caudal de escorrentía superficial.

#### **2.4.3. Zonas de recarga hídrica subterránea**

Son las zonas de la cuenca hidrográfica en las que el flujo vertical proveniente de la infiltración es significativo. Estas zonas son de alta importancia para la formación de cuerpos de agua subterránea. Para la evaluación de zonas de recarga hídrica se pueden considerar dos métodos: directo (por medio de sondeos, bombeos y prospección del agua subterránea haciendo uso de geofísica) e indirecto (mediante balance hidrogeológico).

### **2.5. Cuenca hidrológica**

Una cuenca es una unidad fisiográfica que corresponde al área acopio de un sistema de cursos de agua definidos por el relieve. El concepto de

cuenca es importante para los planificadores técnicos involucrados en acciones para prevenir la degradación del medio natural. (Faustino, 1993, p. 5)

La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio en la hidrología. Esta incluye dentro de su sistema aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneas. Se puede evaluar de forma cuantitativa el escurrimiento del agua con exactitud superior a otra unidad de análisis. Es considerada como un sistema en el que existen entradas y salidas, integrada por subsistemas que se interrelacionan entre sí. Los subsistemas que integran una cuenca son, de acuerdo con World Vision (2004):

- Subsistema biológico
- Subsistema físico
- Subsistema económico
- Subsistema social

### **2.5.1. Partes de una cuenca**

Según World Vision (2004) las cuencas, de acuerdo al criterio de altitud, están divididas de la siguiente manera:

#### **2.5.1.1. Cuenca alta**

Generalmente son las áreas montañosas limitadas en su parte superior por la divisoria de aguas. En esta zona las pendientes son elevadas, los valles estrechos y los procesos fluviales predominantes son erosivos. Las partes accidentadas forman las montañas y laderas.

### 2.5.1.2. Cuenca media

En la parte media de la cuenca, el cauce principal mantiene un curso más definido. La pendiente no es tan elevada como en la parte alta y se producen procesos erosivos moderados. Generalmente esta parte está formada por tierras onduladas y valles.

### 2.5.1.3. Cuenca baja

Zona donde existen tierras planas con pendiente muy baja, donde el cauce principal desfoga toda el agua. En la parte baja predominan los procesos de sedimentación en que todo el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección. Esto depende directamente del tamaño de la cuenca y la ubicación del punto de interés.

Figura 3. Partes de una cuenca hidrográfica

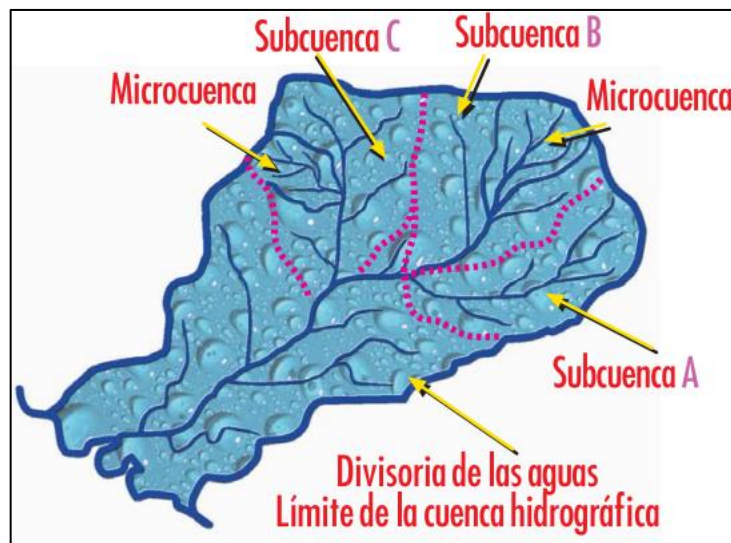


Fuente: World Vision (2004). *Manual de manejo de cuencas*.

### 2.5.2. División de una cuenca hidrográfica

La red hídrica de la cuenca es fundamental para delimitar los espacios en que se divide la misma. Se puede dividir el sistema de la cuenca en espacios definidos por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con el curso principal. Al afluente secundario que llega al cauce principal se le denomina subcuenca. Una microcuenca es el afluente terciario que llega al cauce principal de la subcuenca, aunque esto también dependerá de la escala de trabajo y el país. La cuenca hidrográfica está formada solamente por las aguas superficiales que fluyen en esta.

Figura 4. División de una cuenca hidrográfica



Fuente: World Vision (2004). *Manual de manejo de cuencas*.



## **2.6. Factores que intervienen en el proceso de recarga hídrica natural**

De acuerdo con INAB (2003), la recarga hídrica potencial de un acuífero depende de factores y procesos naturales que ocurren dentro de la cuenca de estudio, estos pueden favorecer o reducir la capacidad de recarga. Los factores más relevantes en el proceso de recarga hídrica natural son:

### **2.6.1. Factores climáticos**

Los factores climáticos que afectan el proceso de recarga hídrica natural son la precipitación pluvial, la evaporación del agua y la evapotranspiración que produce la salida del agua debido a la transpiración de las plantas.

#### **2.6.1.1. Precipitación pluvial**

La precipitación representa el principal aporte de agua al sistema de la cuenca hidrológica, es también un factor de vital importancia para el cálculo de la recarga hídrica. La variación en los valores de precipitación a lo largo del tiempo y espacio está condicionada por la elevación.

Para la medición de la precipitación pluvial se utilizan instrumentos que miden sobre la base de una columna vertical de agua que se acumularía sobre una superficie a nivel. “En el sistema métrico, la precipitación se mide en milímetros” (Ordóñez, 2011, p. 12).

Los pluviómetros son recipientes abiertos, cuyos lados verticales pueden utilizarse para medir la lluvia. El pluviómetro estándar del U.S. National Weather Service tiene un colector con un diámetro de 20 cm (8 in) (Ordóñez, 2011). Su medición puede definirse como medición puntual.

Los pluviógrafos son instrumentos que miden la distribución de lluvia en un intervalo de tiempo determinado. Proporcionan datos de cantidad de lluvia a través del tiempo, mismos que pueden traducirse a intensidad. Para realizar un balance hídrico de una microcuenca o área de estudio se debe conocer la precipitación media para un periodo de tiempo dado.

La precipitación media se determina específicamente para un área determinada o en el mejor de los casos para una cuenca hidrográfica específica, procurando tomar los datos de precipitación lo más correctamente posible para que no se tengan datos falsos, es decir, que debe establecer previamente la consistencia de los registros de precipitación. (Herrera, 1995, p. 49)

Existen varios métodos para calcular la precipitación media dentro de una cuenca o área conocida, entre los cuales se encuentran el método de la media aritmética, el método de los polígonos de Thiessen, curvas isoyetas y el método de la red de puntos.

#### **2.6.1.2. Precipitación efectiva**

Desde el punto de vista de la cobertura vegetal, la precipitación efectiva es el porcentaje de la precipitación atmosférica que puede estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas. Se considera como la cantidad de humedad que puede ser aprovechada por las plantas. Los factores que intervienen en la precipitación efectiva son la intensidad de la precipitación, velocidad de infiltración en el suelo, cobertura vegetal y topografía de la zona de estudio (Herrera, 2004). Entre los métodos para calcular la precipitación efectiva se puede utilizar el método de Zierold Reyes, método de Palacios Vélez,

método de Presscott y Andersen, método de Blaney y Criddle y el método de la FAO.

### **2.6.1.3. Evapotranspiración**

Los datos de temperatura y humedad relativa de la cuenca de estudio son factores que determinan la tasa de evapotranspiración. Los valores típicos de evapotranspiración, en la cual influye el clima. La temperatura, la velocidad del viento, la radiación solar y las horas luz determinan los valores de evapotranspiración.

La evapotranspiración depende de la cantidad de agua que puede almacenar el suelo. El suelo cede agua fácilmente a la atmósfera cuando se encuentra en el estado de capacidad de campo, y cuando se encuentra en el punto de marchitez permanente el agua es retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, por lo que se dificulta su salida hacia la atmósfera.

La vegetación de la zona de estudio define la cantidad de evapotranspiración producida. Las plantas cambian sus valores de intercambio de agua con la atmósfera dependiendo del número de estomas por unidad de superficie, el periodo vegetativo en que se encuentra y la profundidad radicular.

Existen distintos métodos para el cálculo de la evapotranspiración. Se pueden utilizar métodos directos e indirectos. Los métodos directos utilizan lisímetros para la medición de la evapotranspiración potencial. Los métodos indirectos utilizan valores climáticos, de radiación solar, horas luz, entre otros. Algunos métodos indirectos utilizados son método de Blaney y Criddle, método de Penman, método de Hargreaves, entre otros (Herrera, 2004).

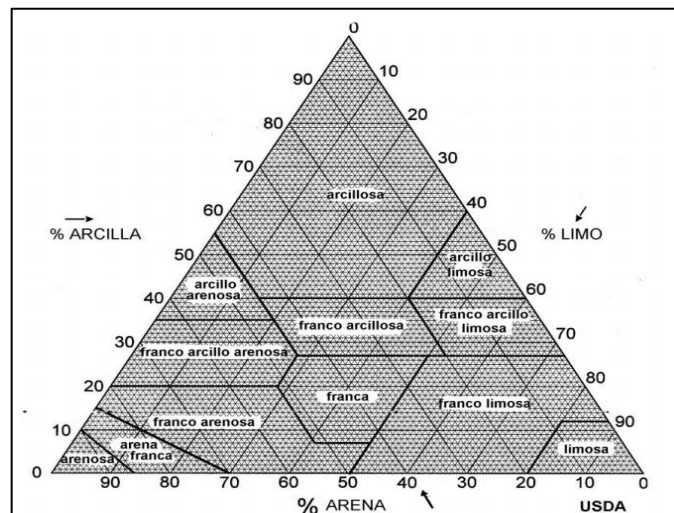
## 2.6.2. Suelo

Las características que afectan la recarga de un acuífero son la textura, la densidad, constantes de humedad y la capacidad de infiltración, y pueden influir en el grado de permeabilidad del suelo en el área de estudio. Suelos compactados o impermeables afectan la infiltración, mientras que los permeables la facilitan (Schosinsky y Losilla, 2011).

### 2.6.2.1. Textura del suelo

Es la proporción en que están constituidos los suelos, sus partículas pueden variar desde la escala en metros (bloques de roca) hasta micras (suelos arcillosos). Esta proporción es expresada en porcentajes de peso de la muestra de suelo, agrupándolos en un intervalo de tamaños (Vásquez y Chang, 1992).

Figura 5. Diagrama textural de la USDA



Fuente: Gisbert (2014). *La textura de un suelo*.

### 2.6.2.2. Densidad aparente

La densidad aparente de un suelo es definida como la masa de un cuerpo contenida dentro de su volumen, incluyendo sus vacíos (Villalaz, 2004).

Para realizar un balance hídrico es necesario conocer los valores de densidad aparente de los suelos, la densidad aparente puede ser modificada por el grado de compactación del suelo, es un parámetro de vital importancia que indica el espacio entre partículas que existe en el suelo y el volumen de espacio poroso en el mismo (Sandoval, 1989)

El contenido de humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua presente en el suelo en relación a su volumen total. De acuerdo con el grado de saturación del suelo se pueden establecer rangos en los que el límite superior aprovechable es llamado capacidad de campo y el límite inferior punto de marchitez permanente (Zotarelli *et al.*, 2013).

El agua puede ser retenida en el suelo por fuerzas capilares, fuerzas no capilares y agua no retenida en el suelo. Según Villalaz (2004), para el balance hídrico de suelos dentro de un área de estudio es necesaria la capacidad de retención de suelos. La cantidad de agua que proviene del proceso de precipitación es inversamente proporcional a la capacidad de los suelos de retenerla. Para el balance hídrico de suelos se determinan las constantes de humedad de los suelos, que son:

- Capacidad de campo (CC): es definida como el límite superior de almacenamiento de agua de un determinado tipo de suelo. “Es el contenido de agua que tiene un suelo después de que se saturó y drenó libremente por espacio de 24 a 72 horas” (Petillo *et al.*, 2016, p. 1)

- Punto de marchitez permanente (PMP): es cuando el suelo ha perdido toda la humedad que tendría disponible debido a las plantas presentes en el mismo. Comúnmente el punto de marchitez permanente (PMP) equivale al contenido de humedad que permanece en el suelo a una tensión de 15 atmósferas (Bras, 1990).
- Agua utilizable por las plantas: de forma técnica se define como el agua sobrante, o la diferencia que existe entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP).

### **2.6.2.3. Infiltración**

Es el agua proveniente de la precipitación (en su mayoría) y que penetra en el suelo, a través de los estratos de la superficie de la tierra, esta puede quedar retenida en el suelo o alcanzar el nivel freático.

La infiltración es afectada por factores que definen las características del terreno o medio permeable y factores que definen las características del fluido que se infiltra (Custodio y Llamas, 2001). Dentro de las características del terreno o medio permeable que afectan la infiltración se encuentra las condiciones de la superficie, características del terreno y las condiciones ambientales del área de estudio. El fluido infiltrado, que normalmente es agua, también influye en la tasa de infiltración del suelo. El espesor de la lámina, la turbidez del agua, el contenido de sales y la temperatura son algunos de las características que afectan el proceso de infiltración (Custodio y Llamas, 2001).

Algunos de los métodos para estimar la infiltración básica del suelo son el método del doble cilindro (método de Müntz), que consiste en el uso de dos superficies cilíndricas abiertas por las dos bases y unidas entre sí para

mantenerse concéntricas a una profundidad de unos 10 cm, y el método de Porchet, que es el más utilizado debido que no se necesita equipo especial para determinar la infiltración y consiste en excavar un agujero con radio y altura conocidos, y agregando un volumen conocido de agua se toman lecturas en intervalos de tiempo conocidos. Con los datos obtenidos se ajusta a un modelo para estimar la infiltración básica (Custodio y Llamas, 2001).

### **2.6.3. Topografía**

Es la configuración de la superficie terrestre, tomando en cuenta las elevaciones y depresiones de la tierra al considerarlas como un solo sistema. El relieve es el resultado de procesos geológicos y de meteorización sobre los materiales que se encuentran en la superficie (INAB, 2003).

La pendiente es un factor determinante para la tasa de infiltración en las áreas de estudio. La topografía o relieve modifica el drenaje del suelo, el nivel de infiltración, la profundidad, el nivel de erosión, entre otros (Núñez, 1981).

La velocidad de infiltración depende en gran parte de la pendiente del terreno, por lo que en condiciones planas el agua cae a la superficie y el movimiento será lento, por lo que favorecerá el nivel de infiltración en el suelo; caso contrario, si la pendiente es inclinada el agua se desplaza a mayor velocidad y favorece el proceso de escorrentía (INAB, 2003).

### **2.6.4. Cobertura vegetal**

La cobertura vegetal del suelo es un factor que influye en la infiltración del agua. Esto se debe a que la precipitación interceptada por las plantas de la zona disminuye la escorrentía, así como el impacto de la lluvia con el suelo. La

presencia de cobertura vegetal puede beneficiar la infiltración incluso en suelos duros y arcillosos.

Los terrenos con una baja cantidad de área cubierta de zacate tienen un coeficiente de infiltración mayor a los terrenos cultivados. Las áreas cubiertas por bosques y zacate tienen coeficientes de infiltración similares, en cambio, los terrenos cubiertos con pastizal disminuyen el coeficiente de infiltración con respecto al bosque (Schosinsky, 2006).

El volumen de la recarga hídrica de una cuenca es directamente proporcional a la cantidad de cobertura vegetal que contiene la misma, favoreciendo la infiltración y conservando y favoreciendo las características del suelo.

Los aspectos en los que la cobertura vegetal interviene en el proceso de recarga son en la profundidad radicular, que es la cantidad de agua aprovechable por los cultivos, y la intercepción, que es la cantidad de agua de precipitación retenida en los estratos de vegetación (INAB, 2003).

#### **2.6.5. Geología**

Los estudios estratigráficos de la zona de estudio son de vital importancia. La geología afecta de forma significativa la recarga hídrica. Los factores que afectan en el proceso de recarga hídrica natural, mencionados anteriormente, pueden tener valores que favorecen la recarga, sin embargo, si existe una disposición geológica impermeable, la recarga hídrica no será subterránea, si no superficial, representando una entrada de agua hacia cuerpos como ríos, manantiales, lagos, entre otros (INAB, 2003).



Las rocas ígneas y metamórficas no fracturadas tienen permeabilidades bajas, disminuyendo la recarga de acuíferos; por otro lado, las rocas ígneas y metamórficas fracturadas favorecen la recarga profunda. Debido a gran cantidad de poros que poseen las arenas finas, basaltos y karst, el agua circula fácilmente, facilitando la recarga y las gravas y arenas gruesas poseen poros de tamaño grande, por lo que favorecen la recarga hídrica. Las arcillas, las magas, pizarras y rocas eruptivas tienen un grado de cimentación mayor, por lo que la circulación del agua es baja, disminuyendo el volumen de recarga (INAB, 2003).

## **2.7. Balance hídrico**

Para cuantificar los intercambios de agua entre el suelo, las plantas y la atmósfera se utiliza el balance hídrico. Esta representación teórica de las salidas y aportes de los recursos hídricos puede aplicarse a diferente escala, que puede ir desde una parcela hasta regiones enteras.

La ecuación del balance hidrológico es muy simple, sin embargo, la cuantificación de sus componentes es complicada por la medición directa de las mismas, por lo que usualmente se recurre a métodos empíricos basados en modelos experimentales. Para evitar las complicaciones mencionadas se asume que las pérdidas profundas de recurso hídrico son despreciables y que las variaciones de agua almacenada en la cuenca son despreciables para periodos largos (normalmente de un año) (Faustino, 2006).

La ecuación general del balance hídrico se basa en el principio de la conservación de masa. Esta ecuación dicta la igualdad que existe entre los aportes de agua que entran a un volumen de control (cantidad de agua que existe dentro del sistema de estudio) y la cantidad de agua que sale, tomando

en cuenta las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurrida durante un periodo determinado.

De forma general, la ecuación de balance hídrico se representa como la suma de la precipitación y el agua proveniente de otras cuencas es igual a la evapotranspiración más la variación de almacenamiento (Faustino, 2006).

## **2.8. Sistemas de información geográfica**

Un sistema de información geográfica (SIG) es una serie de herramientas que de forma integral relaciona distintos componentes que ayudan en la organización, manipulación, análisis y representación de cantidades enormes de datos de distinta índole, ubicados en el espacio de una forma específica. Los sistemas de información geográfica permiten:

- Lectura, edición, almacenamiento y gestión de datos.
- Análisis de datos espaciales.
- Representación de datos por medio de mapas, informes gráficos, entre otros.

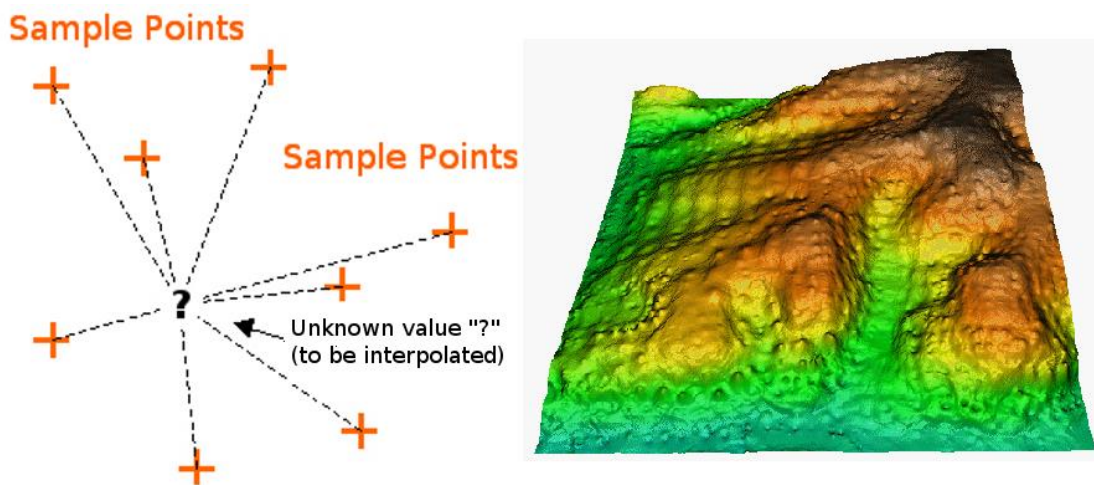
### **2.8.1. Interpolación**

Los métodos de interpolación permiten el cálculo de valores en puntos de los que no se tiene información, a partir de valores conocidos en otra serie de puntos.

### 2.8.1.1. Interpolación por distancia inversa ponderada (IDW)

En este método de interpolación, los puntos de muestreo se ponderan durante la interpolación de manera que la influencia de un punto en relación con otros disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear.

Figura 6. Interpolación IDW



Fuente: Mitas y Mitasova (1999). *Spatial interpolation*

### 2.8.1.2. Interpolación por Spline

Este método de interpolación utiliza una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie de estudio para estimar los valores de celda faltantes, lo cual da como resultado una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (Londoño *et al.*, 2010).

### **2.8.1.3. Interpolación por Kriging**

Este método es parecido al de IDW, en el que se pondera los valores de puntos cercanos al desconocido para calcular una predicción de valores. Utiliza una fórmula matemática que se forma a partir de una suma ponderada de datos (Londoño *et al.*, 2010).

## **2.9. Vulnerabilidad espacial a la contaminación**

Según Foster (1987), la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se refiere a la representación de las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser contaminado por un factor externo que puede agregar contaminantes al mismo.

### **2.9.1. Metodología DRASTIC**

El método DRASTIC busca la sistematización del potencial de los contaminantes para alcanzar el acuífero (Aller *et al.*, 1987). El nombre del método surge de la alusión a los siete parámetros que se superponen para caracterizar espacialmente la vulnerabilidad de un cuerpo de agua subterráneo. Los parámetros mencionados son los siguientes:

- D → Profundidad del agua subterránea
- R → Recarga neta
- A → Medio del acuífero
- S → Medio del suelo
- T → Topografía
- I → Impacto en la zona vadosa
- C → Conductividad hidráulica

### **2.9.2. Metodología GOD**

El método GOD, según Foster y Hirata (1988), ha sido utilizado y muy bien aceptado en Latinoamérica durante las últimas décadas, debido a su simplicidad. El método considera los siguientes parámetros:

- G → Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración.
- O → Ocurrencia del sustrato suprayacente.
- D → Profundidad del nivel de agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados.

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1. Variables**

Dentro de las variables a analizar se tomaron en cuenta los factores que intervienen en el balance hídrico de suelos de acuerdo a la metodología propuesta por Schosinsky (2006), y los que son utilizados para el cálculo de los perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica, mediante la metodología propuesta, utilizando el índice de las presiones (IP) y la vulnerabilidad espacial a la contaminación utilizando la ecuación de DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002).

#### **3.1.1. Variables independientes**

- Precipitación efectiva (mm): la precipitación efectiva es el porcentaje de la precipitación atmosférica que puede estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas, desde el punto de vista de la vegetación.
- Humedad inicial del suelo (mm): humedad de un suelo al iniciar un mes cualquiera.
- Humedad final del suelo (mm): humedad de un suelo al finalizar un mes cualquiera.
- Evapotranspiración real (mm): evapotranspiración producida bajo condiciones meteorológicas de humedad de suelo, y de vegetación existentes en un lugar y tiempo determinado.
- Escorrentía (mm/mes): corresponde a la precipitación mensual, menos la retención de lluvia en el follaje, menos la infiltración.

- Infiltración (mm/día): el agua proveniente de la precipitación y que no ha sido interceptada por los follajes de la vegetación penetra en el suelo.
- Temperatura (°C): los datos de temperatura de la cuenca de estudio son factores que determinan la tasa de evapotranspiración
- Profundidad del acuífero (D): profundidad del nivel piezométrico o zona no saturada.
- Suelo vegetal (s): textura del suelo que recubre la microcuenca de estudio.
- Litología de la zona no saturada (A): se refiere al tipo de roca que conforma la zona no saturada.
- Índice de las presiones (IP): actividades que se realizan en la zona de estudio. Usualmente son de origen antropogénico.

### **3.1.2. Variables dependientes**

- Recarga hídrica natural: capacidad que tiene una cuenca hidrográfica para captar el agua proveniente de la precipitación.
- Balance hídrico de suelos: metodología útil para cuantificar los intercambios de agua entre el suelo, las plantas y la atmósfera de un área específica.
- Índice de vulnerabilidad: parámetro que mide el riesgo de un acuífero de ser contaminado.
- Perímetros de protección: zonas destinadas a la protección de las aguas subterráneas, en las que se propone una serie de actividades permitidas.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El campo de estudio corresponde al área de la cuenca hidrográfica, enfocada a los procesos de balance hídrico de suelos, metodología propuesta

por Schosinsky (2006). En esta metodología se evaluaron parámetros climáticos, edáficos, geológicos, topográficos que permitan calcular el potencial de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte, ubicada en San José Pinula, Guatemala.

El área de estudio es la microcuenca del río Teocinte, ubicada en el municipio de San José Pinula del departamento de Guatemala. Las coordenadas de localización del punto de aforo son:

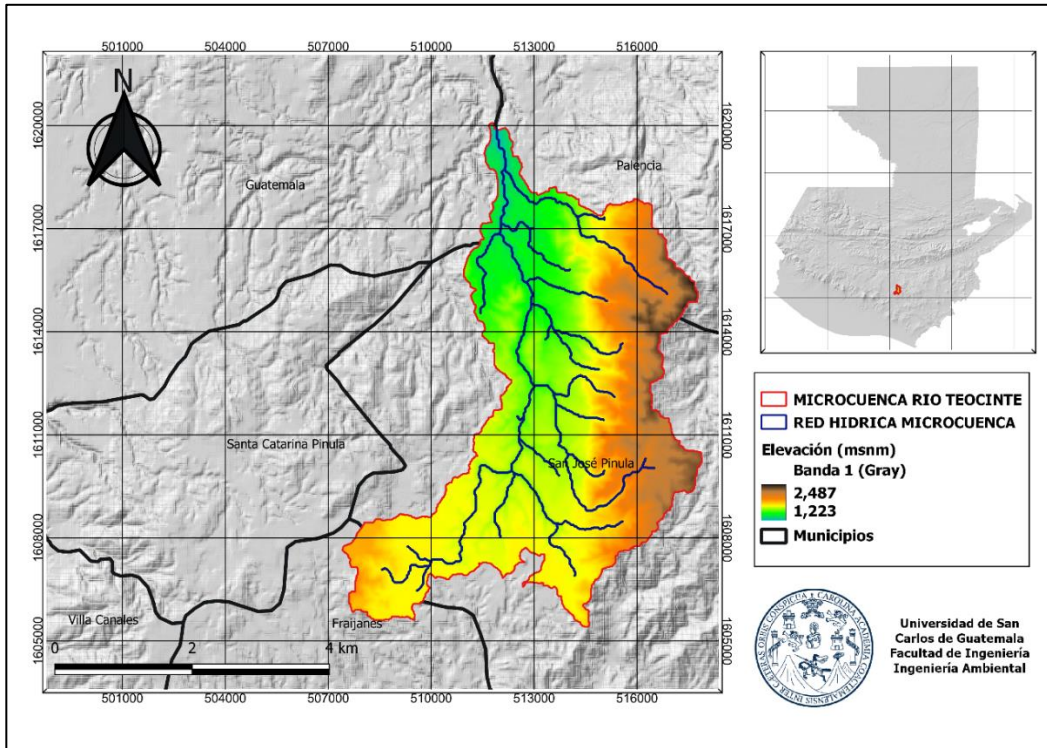
Tabla I. **Ubicación geográfica de punto de aforo de la microcuenca del río Teocinte**

<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
14° 38' 59"	90° 23' 23"

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Mapa de ubicación de la microcuenca del río Teocinte



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

La microcuenca del río Teocinte limita al norte con el municipio de Palencia, departamento de Guatemala; al sur con el municipio de Santa Rosa de Lima, departamento de Santa Rosa; al este con el municipio de Mataquescuintla, departamento de Jalapa; y al oeste con los municipios de Fraijanes, Santa Catarina Pinula y la Ciudad de Guatemala, departamento de Guatemala. El área comprendida dentro de la microcuenca es de alrededor 70.61 Km<sup>2</sup>. Forma parte de la cuenca del río Motagua, por lo que forma parte de la vertiente del Caribe.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: bachiller Luis Rodrigo Ramírez Reyes.
- Asesor: Ing. MSc. Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán, colegiado activo 9826.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

En los siguientes incisos se describen los recursos de materiales disponibles para esta investigación.

#### **3.4.1. Pruebas de infiltración**

- Palas para realizar pruebas de infiltración
- Recipientes de recolección de muestras
- Agua
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Vehículo
- Combustible
- Navegador GPS
- Recipientes para el transporte de agua
- Herramienta para sacar tierra

#### **3.4.2. Análisis de datos y elaboración de mapas de clasificación de zonas de recarga hídrica**

- Computadora.
- Software de SIG.

- Software para análisis estadístico.
- Impresora.
- Tinta de impresora.
- Papel.
- Imágenes satelitales de periodos 2016 a 2020 de la microcuenca en estudio.

### **3.5. Técnica**

Para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos e identificación de zonas de recarga hídrica, por medio del método de balance hídrico de suelos, se utilizó un enfoque mixto, que combina técnicas cualitativas y cuantitativas.

#### **3.5.1. Técnica cualitativa**

Construcción de mapas temáticos que representan de manera visual las zonas de recarga hídrica natural, dentro de la microcuenca del río Teocinte. Para la elaboración de dichos mapas se procederá a la recopilación de información existente en bases de datos cartográficas del área de estudio, tales como mapas de clasificación geológica y mapas de texturas de suelo, así como a la elaboración de mapas de cobertura vegetal y mapas de uso del suelo haciendo uso de análisis de imágenes satelitales, ortofotos correspondientes al periodo de estudio.

#### **3.5.2. Técnica cuantitativa**

A continuación, en los siguientes incisos, se describe la técnica cuantitativa.

### 3.5.2.1. Cálculo de la recarga hídrica natural

Para el cálculo de la recarga hídrica natural se describen a continuación los parámetros a utilizar.

#### 3.5.2.1.1. Cálculo del coeficiente de infiltración de los suelos mediante el método de Porchet

El método de Porchet es una prueba de campo que consiste en la excavación de un agujero de volumen conocido para medir la infiltración base de un suelo determinado (Alvarado y Barahona-Palomo, 2017).

- Limpiar el área de estudio.
- Realizar un agujero de base circular con diámetro de 30 cm y profundidad de 30 – 40 cm.
- Colocar una capa permeable y llenar de agua hasta una altura de 25 cm.
- Quitar la capa permeable y medir el nivel de agua con una cinta métrica.
- Anotar la hora en que se hace la primera medición.
- Realizar mediciones de la altura de agua en el agujero cada 5 minutos hasta llegar a una hora y luego cada hora hasta completar un tiempo de 3 – 4 horas, hasta que el nivel de agua en el suelo se estabilice.
- Tabular los datos y ajustar al modelo de Horton:

$$fp = fc + (fo - fc) * e^{-kt} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

- $f_p$  = capacidad de infiltración (mm/día).
- $f_c$  = capacidad final o equilibrio (mm/día).
- $f_o$  = capacidad inicial (mm/día).
- $K$  = coeficiente de decrecimiento de la capacidad de infiltración en el tiempo.

#### **3.5.2.1.2. Cálculo de la precipitación media de la microcuenca por el método promedio o media aritmética**

El método promedio o media aritmética toma en cuenta un conjunto infinito de números, tomando en cuenta, en este caso, los datos de precipitación de cada estación ubicada dentro de la microcuenca. Se obtiene a partir de la suma de todos los valores de precipitación dividida entre el número de sumandos (Herrera, 2004).

$$Pm = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

$Pm$  = precipitación media

$n$  = número de estaciones dentro de una cuenca

$x_i$  = precipitación de la estación

### 3.5.2.1.3. Determinación de la evapotranspiración real y potencial

El método de Hargreaves está diseñado para la región de Centroamérica. Para calcular la evapotranspiración potencial se utiliza el siguiente proceso:

- La evapotranspiración potencial se calcula con la siguiente ecuación:

$$ETP = 0.0075 * TMF * RSM \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

ETP= evapotranspiración (mm/mes)

TMF= temperatura media mensual en grados °F

RSM= radiación solar incidente mensual

- La radiación mensual incidente se calcula con la siguiente ecuación:

$$RSM = 0.075 * RMM * \sqrt{S} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

RMM= radiación mensual extraterrestre (mm/mes)

S: brillo mensual (%)

Para calcular la radiación mensual extraterrestre se utiliza la siguiente ecuación:

$$RMM = RS * \text{No. de días del mes} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

Rs= radiación solar (mm/día) (apéndice 1)

- Para el cálculo del brillo solar se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \left(\frac{N}{24}\right) * 100 \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

N= horas de brillo solar (Anexo 1)

La evapotranspiración real se calcula con la siguiente expresión:

$$ETR = ETP * \left(\frac{C_1 + C_2}{2}\right) \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde:

ETR= evapotranspiración real

ETP: evapotranspiración potencial

C1= coeficiente de humedad al final de mes sin ETP

C2= coeficiente de humedad al final de mes con ETPR

- Para calcular las constantes de humedad se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C_1 = \frac{Hi - PMP + PI}{CC - PMP} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

$$C_2 = \frac{Hi - PMP + PI - C_1 * ETP}{CC - PMP} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

Hi= humedad inicial del suelo (mm)

PMP= punto de marchitez permanente

CC= capacidad de campo

Pi= precipitación infiltrada

EPT= evapotranspiración potencial

Los datos de PMP y CC se tomaron del *Estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala* (MAGA-DIGEGR, 2017), en el que se hace una clasificación de los tipos y texturas del suelo presentes en el departamento.

Criterios para tomar en cuenta:

Tabla II. **Criterios para tomar en cuenta para el cálculo de las constates de humedad**

Resultado	Condición
$C1 > 1$	$C1 = 1$
$C1 < 0$	$C1 = 0$
$C2 > 1$	$C2 = 1$
$C2 < 0$	$C2 = 0$

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

- Para definir los valores que tomó la evapotranspiración real se calculó el valor de la humedad disponible. Esta se calcula de la siguiente manera:



$$HD = HS_i - PMP + P_i \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Donde:

HD= humedad disponible (mm/mes)

HSi= humedad del suelo al iniciar el mes (mm)

Pi= precipitación infiltrada (mm/mes)

PMP= punto de marchitez permanente (mm)

Tabla III. **Criterios a tomar en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración real**

Resultado	Condición
$(\frac{C_1+C_2}{2} * ETP) < HD$	$ETR = \frac{C_1 + C_2}{2} * ETP$
$(\frac{C_1+C_2}{2} * ETP) > HD$	$ETR = HD$

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

#### 3.5.2.1.4. Cálculo de la intercepción

Es la parte de la lluvia retenida por la vegetación presente en la microcuenca de estudio. Para terrenos en los que su uso es bosque se utiliza un coeficiente de intercepción de 20 %, mientras que para otros usos en general se usa un 12 % (Schosinsky, 2006).

La intercepción se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$Ret = Cfo * P \quad [Ecuación 11]$$

Donde:

Ret= retención (mm/mes)

Cfo= coeficiente de intercepción del follaje

Pm= precipitación media de la microcuenca de estudio (mm/mes)

Tabla IV. **Criterios a tomar en cuenta para el cálculo de la intercepción**

Resultado	Condición
Pm<5	Ret=Pm
(Cfo*Pm)>5	Ret=(Cfo*Pm)
P>5 y (Cfo*Pm)<5	Ret=5

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

### 3.5.2.1.5. Cálculo de la infiltración

La infiltración de la lluvia proveniente de la precipitación depende de la cantidad de agua que no ha sido retenida por el follaje de la vegetación presente en la zona. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Pi = Ci * (P - Ret) \quad [Ecuación 12]$$

Algunos criterios para tomar en cuenta para definir el coeficiente de infiltración:

Tabla V. **Criterios para definir el coeficiente de infiltración**

Resultado	Condicionante
$(K_{fc}+k_v+k_p)>1$	$C_i=1$
$(K_{fc}+k_v+k_p)<1$	$C_i= K_{fc}+k_v+k_p$

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

Donde:

$C_i$ = coeficiente de infiltración

$K_{fc}$ = fracción de infiltración por la textura del suelo

$K_v$ = fracción de infiltración por la vegetación

$K_p$ = fracción de infiltración por la pendiente

Los valores de  $k_p$ ,  $k_v$  y  $k_{fc}$  fueron propuestos por Schosinsky y Losilla en 2000, y se dan en las tablas V y VI. Los datos para realizar el cálculo se obtuvieron del *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Guatemala, Guatemala*. Los datos de pendiente se calcularon utilizando el modelo de elevación digital a 20 metros (DEM) del MAGA. La cobertura vegetal se definió por medio del análisis de imágenes satelitales de Landsat 8 de la zona de estudios del periodo comprendido entre el año 2018 al 2021.

Tabla VI. **Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente**

	Pendiente	$K_p$
Muy plana	0.02 %-0.06 %	0.30
Plana	0.3 %-0.4 %	0.20
Algo plana	1 %-2 %	0.15

Continuación de la tabla VI.

	<b>Pendiente</b>	<b>Kp</b>
Promedio	2 %-7 %	0.10
Fuerte	Mayor de 7 %	0.06

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

Tabla VII. **Componentes del coeficiente de infiltración por cobertura vegetal**

<b>Cobertura vegetal</b>	<b>Kv</b>
Cobertura con zacate menos del 50 %	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75 %	0.21

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

Para calcular el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (Kfc), se utiliza la siguiente ecuación:

$$Kfc = 0.2671 * \ln(fc) - 0.000154 * fc - 0.723 \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Donde:

Kfc= coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo

fc= infiltración básica del suelo (mm/día)

Tabla VIII. **Criterios para definir el coeficiente de infiltración por textura**

<b>Resultado</b>	<b>Condicionante</b>
fc < 16 mm/día	Kfc=0.0148*fc/16
fc > 1568 mm/día	Kfc=1
16 < fc < 1568	Kfc=0.267*ln(fc)-0.000154*fc-0.723

Fuente: Schosinsky (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.*

#### **3.5.2.1.6. Cálculo de la escorrentía superficial**

La escorrentía superficial es la parte del agua que precipita y que no infiltra. Esta se calcula con la siguiente fórmula:

$$ESC = P - pi \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Donde

ESC= escorrentía superficial (mm/mes)

P= precipitación mensual (mm/mes)

Pi= infiltración mensual (mm/mes)

#### **3.5.2.1.7. Cálculo de la recarga hídrica natural**

El cálculo de la recarga hídrica natural se realiza de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Rh = P + Hsi - ETR - Hsf \quad \text{[Ecuación 15]}$$

Donde:

Rh= recarga hídrica potencial del acuífero

Hsi= humedad inicial del suelo (mm)

Hsf= humedad final del suelo (mm)

ETR= evapotranspiración real (mm)

### **3.5.2.2. Balance hídrico de suelos de la microcuenca del río Teocinte**

El cálculo del balance hídrico de suelos, utilizando los datos calculados en los incisos anteriores, se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$Pp = ETR + ESC + RET + Rh \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde:

Pp= precipitación pluvial (mm)

ETR= evapotranspiración real (mm)

ESC= escorrentía superficial (mm)

Rh= recarga hídrica (mm)

## **3.6. Recolección, ordenamiento y procesamiento de la información**

La recolección de datos se llevó a cabo de acuerdo como se presenta a continuación.

### 3.6.1. Recolección de información climática

Debido a la falta de información climática sobre la microcuenca, se recopiló información de un periodo de cinco años para cuantificar la recarga hídrica natural de la misma. Se utilizó el periodo comprendido de enero de 2016 a diciembre de 2020.

### 3.6.2. Recolección de información de pruebas de infiltración

En la tabla IX se presenta la clasificación de unidades de muestreo de la microcuenca del río Teocinte:

Tabla IX. **Clasificación de unidades de muestreo de la microcuenca del río Teocinte**

Número	Textura del suelo	Cobertura del suelo
1	Variado	Impermeable
2	FAr	Bosque
3	FA	Pastizal
4	FAr	Pastizal
5	FA	Bosque
6	FArA	Pastizal
7	FAr	Cultivos
8	F	Pastizal

Continuación de la tabla IX.

Número	Textura del Suelo	Cobertura del suelo
9	FA	Cultivos
10	FArA	Cultivos
11	FArA	Bosque
12	F	Cultivos
13	Ar	Cultivos

Fuente: elaboración propia.

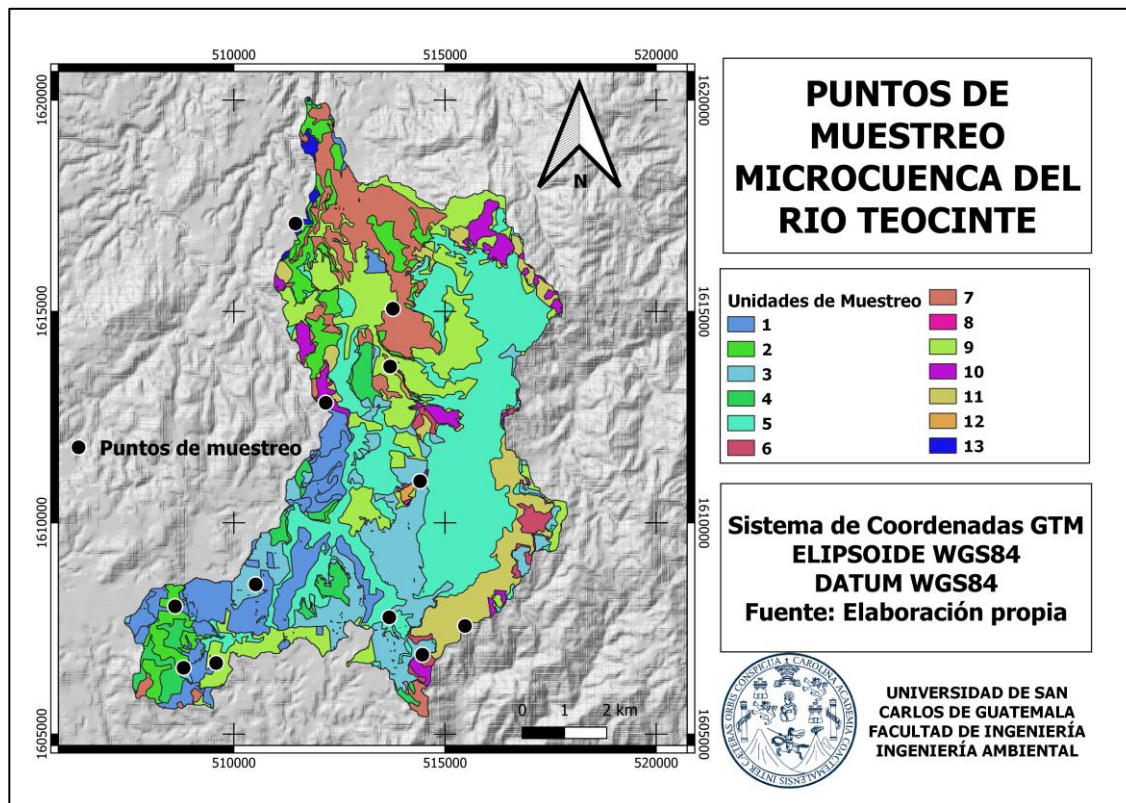
Tabla X. **Ubicación de pruebas de infiltración**

Unidad de muestreo	Pruebas realizadas	Coordenadas geográficas	
		N	W
2	1	14° 32' 31.434"	90° 25' 12.6768"
3	1	14° 32' 48.6708 "	90° 24' 08. 5608"
4	1	14° 31' 44.274"	90° 25' 05. 808"
5	1	14° 32' 25.1052"	90° 22' 15.996"
6	1	14° 31' 50.2068"	90° 21' 52.848"
7	1	14° 36' 20.8548"	90° 22' 20.2224"
8	1	14° 34' 07.4731"	90°21' 56.4321"
9	1	14° 31' 47.4636"	90° 24' 40.4203"
10	1	14° 35' 08.9052"	90° 23' 07.2816"
11	1	14° 32' 17.844"	90° 21' 22.4856"
12	1	14° 35' 36.2292"	90° 22' 22.8648"
13	1	14° 37' 26.6232"	90° 23' 37.0572"

Fuente: elaboración propia.



Figura 8. Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.6.3. Recopilación de datos para el cálculo de la recarga hídrica

En la tabla XI se presenta la recopilación de datos para el cálculo de la recarga hídrica:

Tabla XI. **Clasificación de unidades de mapeo de la microcuenca del río Teocinte**

Unidad de mapeo	Textura del suelo	Cobertura del suelo	Clasificación de pendiente	Área (km <sup>2</sup> )
1	Variado	Impermeable	Promedio	7.343
2	FA	Bosque	Fuerte	19.538
3	FA	Cultivos	Fuerte	8.34
4	Far	Cultivos	Fuerte	5.76
5	FArA	Bosque	Fuerte	4.785
6	Far	Bosque	Fuerte	4.562
7	FA	Pastizal	Promedio	3.745
8	FA	Pastizal	Fuerte	3.268
9	FA	Cultivos	Promedio	2.946
10	FArA	Cultivos	Fuerte	2.14
11	Far	Pastizal	Fuerte	1.95
12	FA	Pastizal	Algo plana	1.254
13	FA	Bosque	Promedio	1.112
14	Far	Cultivos	Promedio	1.038
15	FArA	Pastizal	Fuerte	0.922
16	Far	Pastizal	Promedio	0.931
17	FA	Cultivos	Algo plana	0.581
18	FA	Bosque	Algo plana	0.15
19	F	Pastizal	Promedio	0.068
20	Ar	Cultivos	Promedio	0.309
21	F	Cultivos	Promedio	0.21
			<b>Total</b>	<b>70.952</b>

Fuente: elaboración propia.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Se tabuló, ordenó y procesó la información tal como se describe a continuación.

#### **3.7.1. Recarga hídrica del área de estudio**

En la tabla XXI se presenta el balance hídrico de suelos total de la microcuenca del río Teocinte, cuantificando cada uno de los volúmenes de entrada y salida de agua en las zonas de mapeo.

#### **3.7.2. Mapa de recarga hídrica de la microcuenca de estudio**

Se elaboraron mapas de zonas de recarga hídrica de acuerdo con la clasificación obtenida en la tabla XVI, utilizando el SIG QGIS 3.10.8.

De acuerdo con la metodología propuesta por Schonsinsky (2007), para calcular la recarga anual en una cuenca hidrográfica es necesario dibujar la misma. Una vez delimitada la cuenca, se debe dividir dentro de ella las zonas con el mismo tipo de textura del suelo, ya que en estos se encuentran mismos valores de infiltración base, áreas con un mismo uso de suelo y mismas áreas con intervalos de pendientes específicos. Estas zonas de características similares se denominarán unidades de mapeo.

Para obtener los puntos de muestreo, en los que se realizó la identificación de las zonas de recarga hídrica, se intersecaron polígonos que tengan texturas de suelos y uso de la tierra similares.

### 3.7.2.1. Mapa de texturas de suelo

Para estimar la recarga potencial se separó la cuenca hidrográfica en varias zonas con permeabilidad similar, ya que áreas con una textura específica tienen valores similares de infiltración (Schosinsky, 2006).

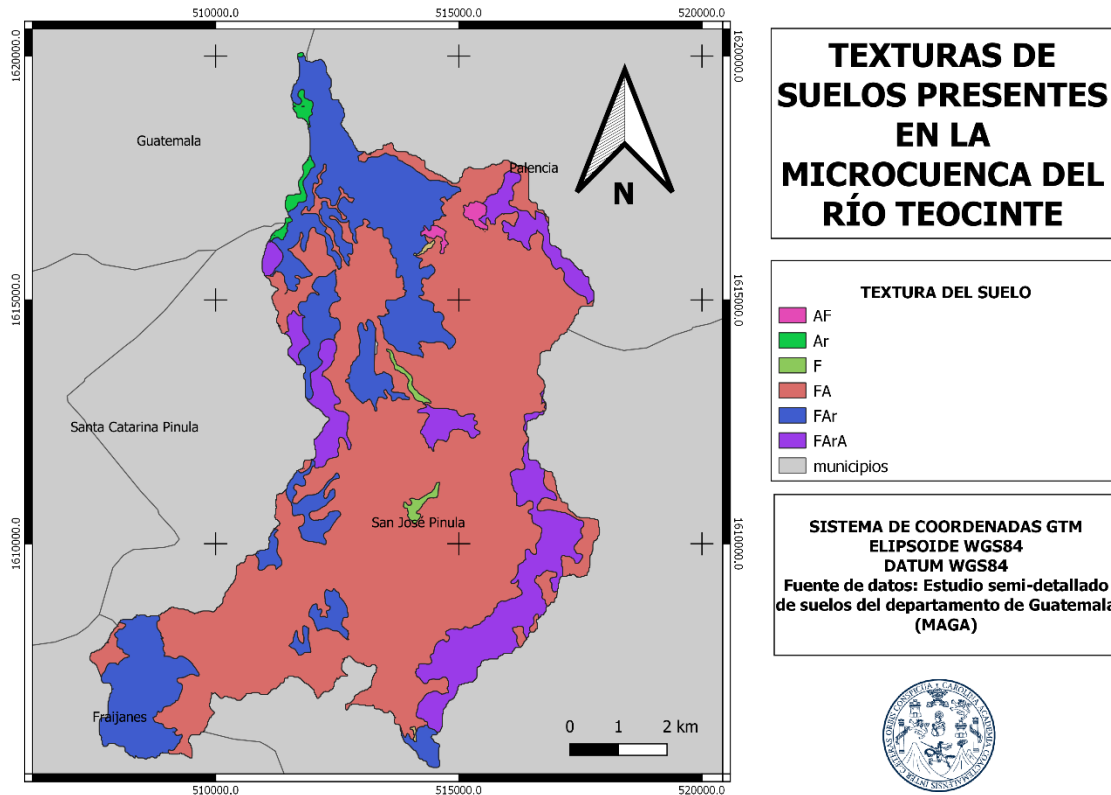
Se utilizó la hoja cartográfica del estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA-DIGEGR, 2017), identificando seis principales grupos de textura de suelo, entre los que se encuentran Arena Franca (AF), Arcilla (Ar), Franco (F), Franco Arenoso (FA), Franco Arcilloso (FAr) y Franco Arcilla Arenosa (FArA).

Tabla XII. **Textura de suelos presentes en la microcuenca del río Teocinte**

<b>Etiqueta</b>	<b>Descripción</b>
AF	Arena Franca
Ar	Arcilla
F	Franco
FA	Franco Arenoso
FAr	Franco Arcilloso
FArA	Franco Arcilla Arenosa

Fuente: elaboración propia, empleando datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Figura 9. **Mapa de texturas de suelos de la microcuenca del río Teocinte**

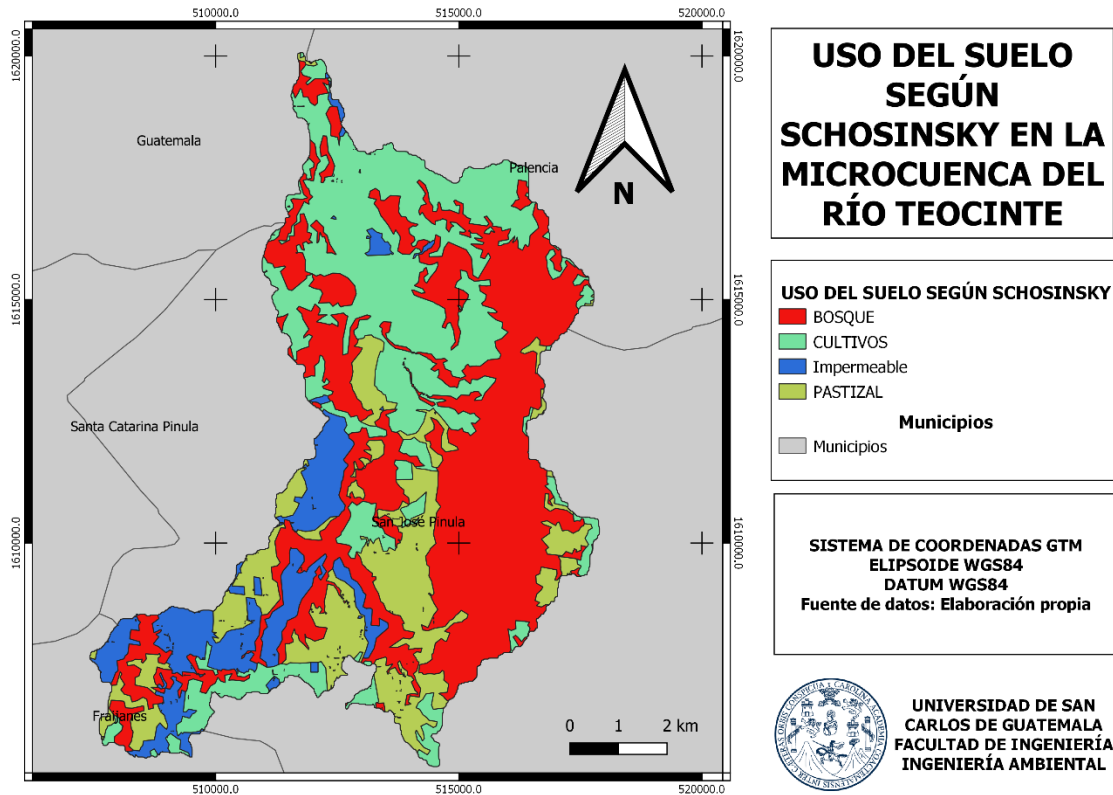


Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.2.2. Mapa de usos del suelo

Haciendo uso de imágenes satelitales, se digitalizó la cobertura de la microcuenca de acuerdo con los parámetros establecidos en la tabla VI. Los valores de coeficientes de infiltración varían de acuerdo a la cobertura del suelo (Schosinsky, 2006). Se identificaron cuatro tipos de cobertura distinta dentro de la microcuenca: bosques, cultivos, áreas impermeables y pastizales.

Figura 10. **Mapa de uso del suelo dentro de la microcuenca del río Teocinte**

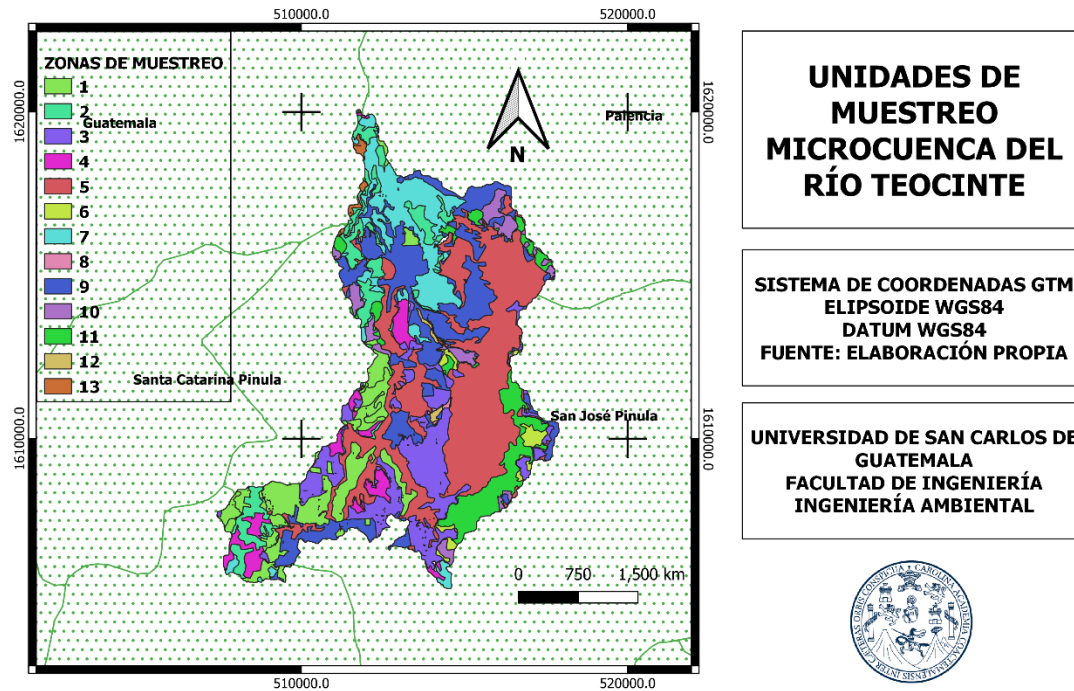


Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.2.3. Mapa de unidades de muestreo

Haciendo uso de las herramientas que ofrece el sistema de información geográfica QGis se intersecaron los polígonos de usos de suelo y texturas de suelo identificadas dentro de la microcuenca de estudio y se establecieron 13 unidades de muestreo que tienen coeficientes de infiltración similares de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente (Schosinsky, 2006).

Figura 11. Mapa de unidades de muestreo

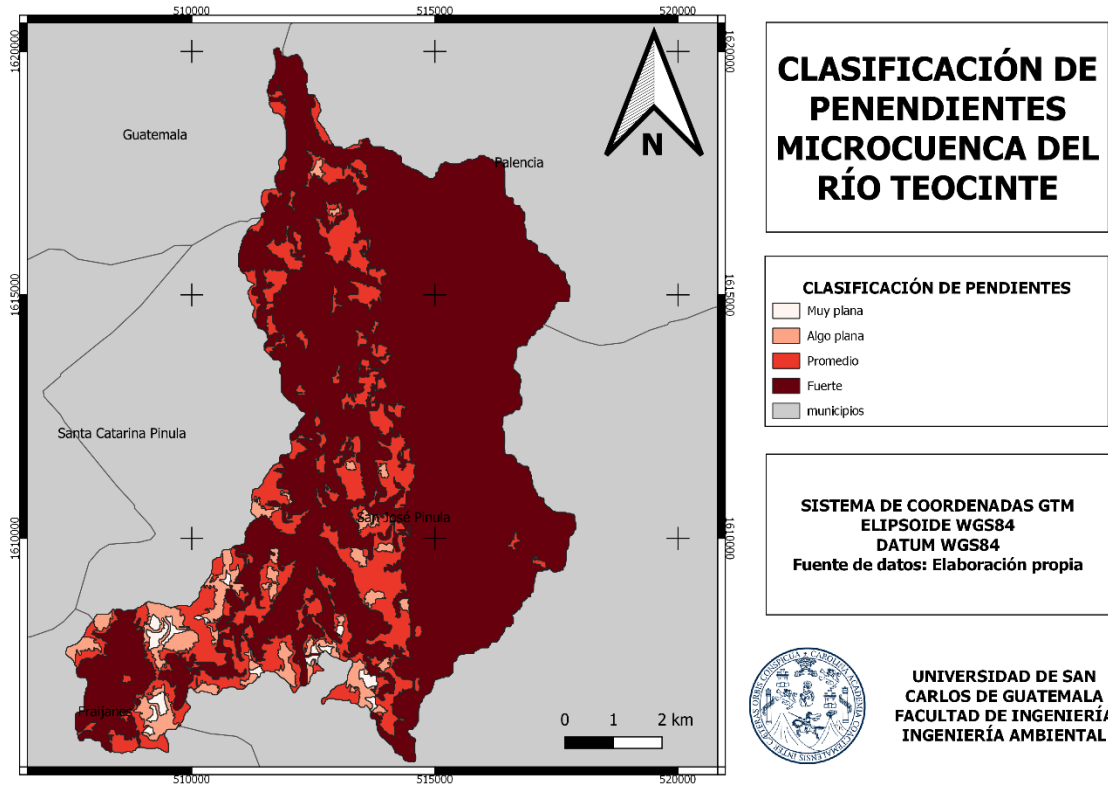


Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

#### 3.7.2.4. Mapa de pendientes

Se clasificaron las pendientes dentro de la cuenca delimitada, de acuerdo con la clasificación hecha por Schosinsky mostrada en la tabla VI, para el cálculo del coeficiente de infiltración debido a la pendiente del terreno, encontrándose zonas de pendiente muy plana, algo plana, promedio y fuerte.

Figura 12. **Mapa de clasificación de pendientes de la microcuenca del río Teocinte**



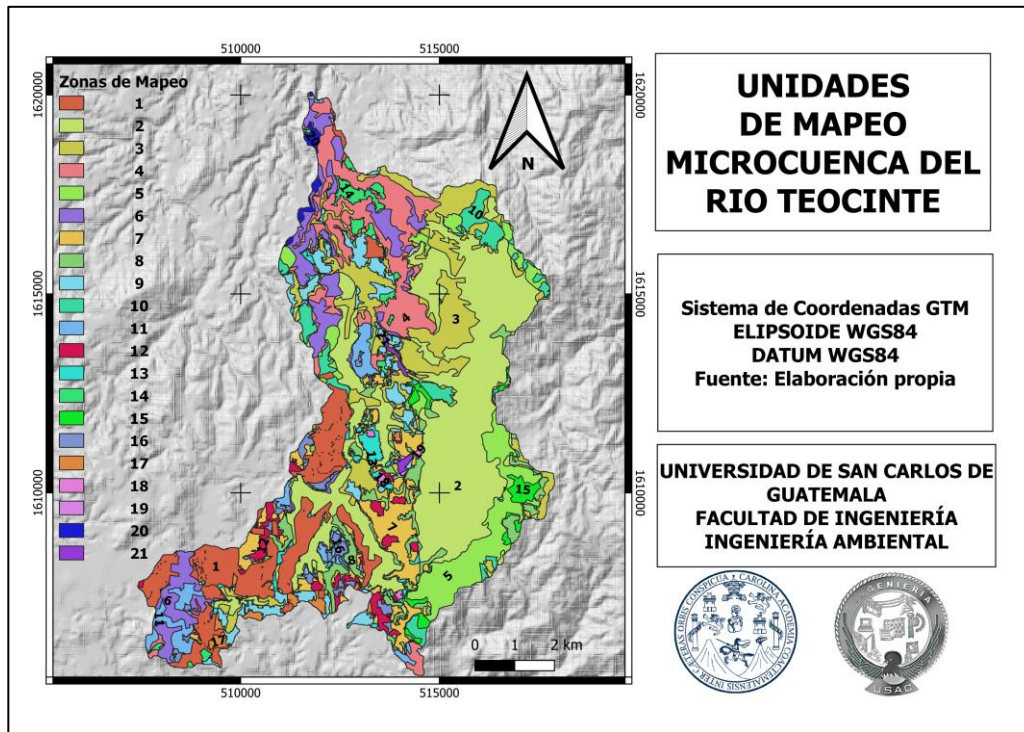
Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.2.5. Mapa de unidades de mapeo

Haciendo uso de las herramientas que ofrece el sistema de información geográfica QGis se interceptaron los polígonos de usos de suelo, texturas de suelo y de clasificación de pendiente identificadas dentro de la microcuenca de estudio y se establecieron 21 unidades de mapeo que tienen coeficientes de infiltración similares de acuerdo con los parámetros mencionados anteriormente (Schosinsky, 2006).



Figura 13. Mapa de unidades de mapeo



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.2.6. Identificación de zonas de recarga hídrica

Para la clasificación e identificación de las unidades de mapeo se utilizó el criterio propuesto (Herrera, 2002). Este criterio clasifica las unidades de mapeo de forma cuantitativa, en función del volumen de recarga hídrica natural.

Para obtener la recarga potencial de la microcuenca de estudio, para cada una de las unidades de mapeo indicadas en la tabla XI, se realizaron los cálculos indicados en la metodología del balance hídrico de suelos, para obtener la recarga potencial en cada uno de los polígonos. El volumen de agua que recarga al acuífero estará dado por la siguiente ecuación:

$$V = R_p * A$$

[Ecuación 17]

Donde:

V= volumen de recarga (m<sup>3</sup>/mes o m<sup>3</sup>/año)

R<sub>p</sub>= recarga potencial al acuífero (m/mes o m/año)

A= área de cada una de las unidades de muestreo (m<sup>2</sup>)

### **3.7.3. Delimitación de perímetros de protección**

La metodología propuesta para delimitar perímetros de protección utiliza un criterio denominado índice RI (Risk Index) (Jiménez-Madrid *et al.*, 2013), para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante un producto de matriz de doble entrada entre valores de vulnerabilidad intrínseca, obtenido por medio del método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) y la intensidad de las presiones y riesgos en la masa de agua subterránea (González-Celada, 2020).

#### **3.7.3.1. Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea**

Se utilizó el método DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002), basado en el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero presente en la microcuenca de estudio. Este método se basa en el consideración y valoración de parámetros como: recarga neta anual de la zona de estudio, litología del acuífero, naturaleza del suelo, topografía del terreno, profundidad del nivel freático y permeabilidad. Los parámetros descritos se ponderan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Vuln. = 3S + 4A + 5D + 4R \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

S= suelo vegetal

A= litología de la zona no saturada

D= espesor de la zona no saturada

R= recarga neta de la zona de estudio

Tabla XIII. **Rangos, valores y clases de vulnerabilidad aplicando el método Drastic reducido**

Clases de vulnerabilidad	DRASTIC Reducido		
	Rango del índice	Valor	
Vulnerabilidad muy baja	16 - 30	1	1
	30 - 44	2	
Vulnerabilidad baja	44 - 58	3	2
	58 - 72	4	
Vulnerabilidad moderada	72 - 86	5	3
	86 - 100	6	
Vulnerabilidad alta	100 - 114	7	4
	114 - 128	8	
Vulnerabilidad muy alta	128 - 142	9	5
	143 - 156	10	

Fuente: Jiménez (2012). *La protección del agua subterránea empleada para consumo humano y su integración en la ordenación del territorio.*

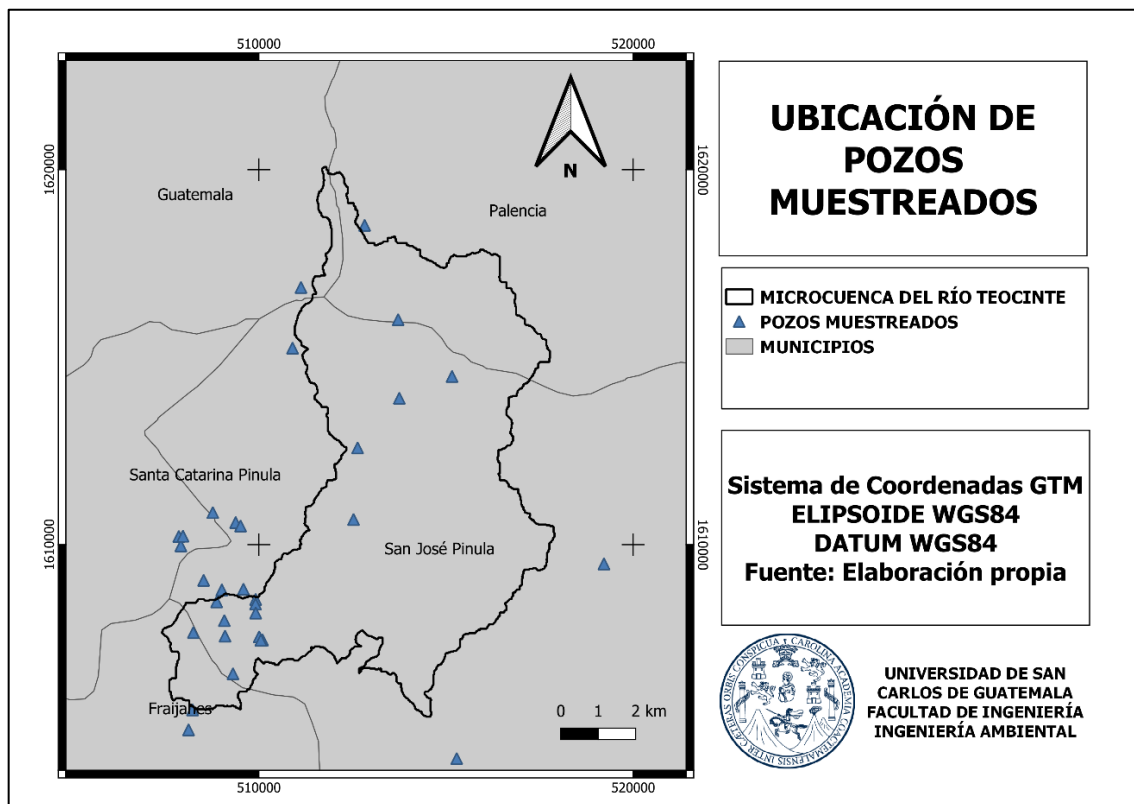
### 3.7.3.1.1. **Espesor de la zona no saturada o profundidad (D)**

La profundidad a la que se encuentra el acuífero es un factor determinante en la ecuación que define la vulnerabilidad según DRASTIC. Esta

define el tiempo en el cual los contaminantes superficiales pueden alcanzar las aguas subterráneas. Por lo tanto, mientras mayor sea la profundidad a la que se encuentra el acuífero, menor será la vulnerabilidad ante cualquier contaminante que pueda afectar en la superficie.

Para obtener la profundidad del acuífero de la microcuenca del río Teocinte se recopiló la información del nivel estático de 32 pozos presentes dentro y en los alrededores de la microcuenca en estudio. La información fue proporcionada por las municipalidades de San José Pinula y Palencia.

Figura 14. **Mapa de ubicación de pozos muestreados**



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

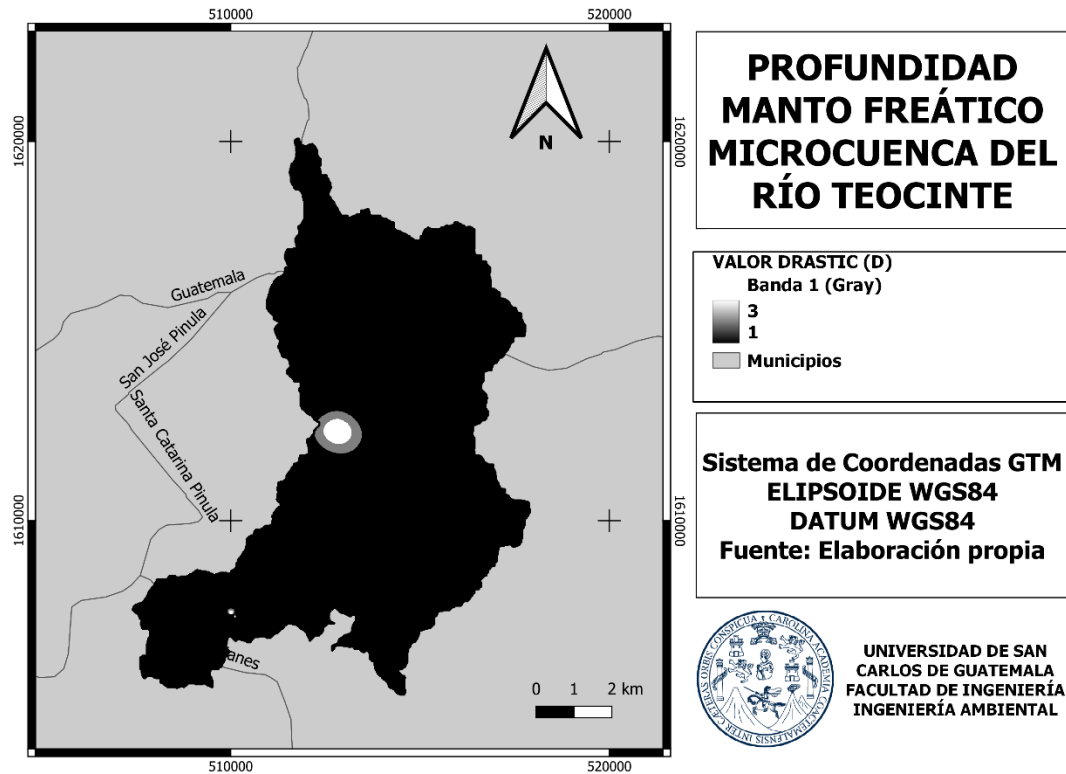
Obtenidos los datos del nivel estático para cada pozo se realizó una interpolación IDW en el software de información geográfica QGIS y se reclasificaron las profundidades para el área de la microcuenca en estudio, según los valores propuestos por la metodología DRASTIC.

Tabla XIV. **Valor DRASTIC asignado a cada rango de profundidad del acuífero (D)**

<b>Profundidad del acuífero (m)</b>	<b>Valor</b>
0 - 1.64	10
1.64 - 4.92	9
4.92 - 9.84	7
9.84 - 16.40	5
16.40 - 24.61	3
24.61 - 32.81	2
> 32.81	1

Fuente: Aller, Bennett, Lehr, Petty y Hackett (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings: U.S.*

Figura 15. Mapa de profundidad



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.3.1.2. Recarga neta anual (R)

La recarga neta anual es el agua proveniente de la precipitación, se infiltra a través del medio no saturado y recarga el acuífero. En el proceso influyen variables climáticas, edáficas, de cobertura vegetal, profundidad de las raíces, evapotranspiración real y la pendiente del terreno. La cantidad de precipitación que recarga el acuífero es directamente proporcional a la cantidad de contaminante que puede llegar al mismo.

Para obtener la recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte se utilizó el método del balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky y Losilla (2000). Se procedió a clasificar cada uno de los valores calculados de lámina de agua que recarga el acuífero de acuerdo con los propuestos por el método DRASTIC.

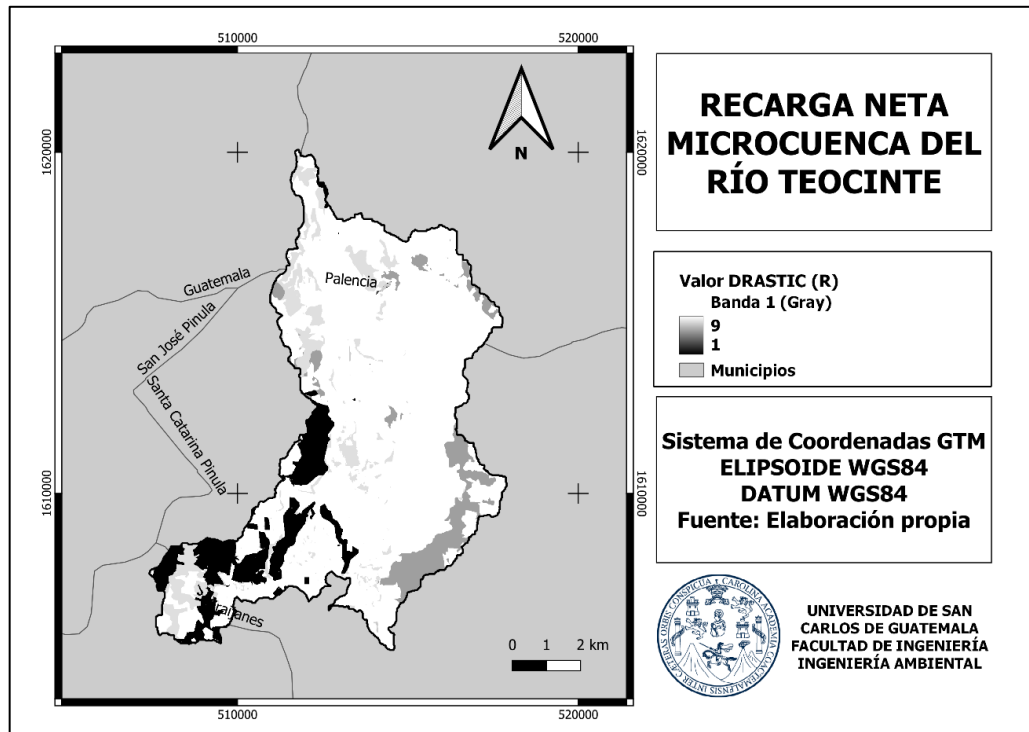
Tabla XV. **Valor DRASTIC asignado a la recarga neta (R)**

Recarga del acuífero (mm/año)	Valor
0 – 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Fuente: Aller *et al.* (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings: U.S.*

Haciendo uso del sistema de información geográfica QGIS se procedió a rasterizar la capa de tipo *shape* de zonas de recarga hídrica de acuerdo con los valores propuestos por la metodología DRASTIC, indicados en la tabla XVII.

Figura 16. **Mapa de recarga neta del acuífero según DRASTIC**



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.3.1.3. Litología de la zona no saturada (A)

El material geológico presente en la zona no saturada refleja, en gran medida, la condición de flujo que influye en el potencial de contaminación, este puede ser mayor o menor de acuerdo con el tipo de litología que se encuentra sobre el acuífero. El sistema de flujo dentro del acuífero se ve afectado por el medio, la ruta y la longitud del trayecto que debe recorrer el contaminante. El factor de ponderación en la ecuación del método DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002) se clasifica de acuerdo con la siguiente tabla:



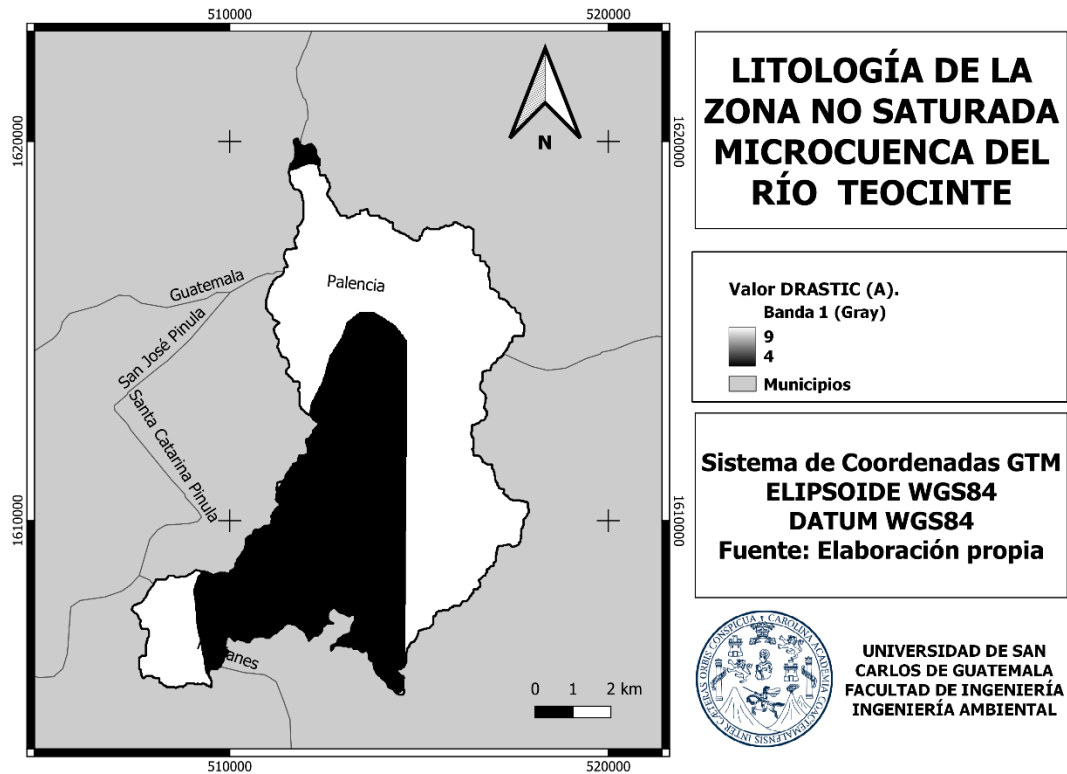
Tabla XVI. **Valor DRASTIC asignado a la litología de la zona no saturada**  
(A)

<b>Litología de la zona no saturada</b>	<b>Valor</b>
Arcillas, margas, limos	2
Ígneas/metamórficas	4
Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	6
Areniscas masivas	6
Calizas masivas	6
Arenas, gravas y conglomerados	8
Volcánicas	9
Calizas karstificadas	10

Fuente: Aller *et al.* (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings: U.S.*

Se procedió a rasterizar la capa de archivo tipo *shape* de unidades geológicas del MAGA (2005), de acuerdo con los valores propuestos por la metodología DRASTIC, en la que se encontraron dos tipos de litología presentes en la microcuenca de estudio: las rocas ígneas y metamórficas y las rocas volcánicas fracturadas.

Figura 17. Mapa de litología de la zona no saturada según DRASTIC



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

#### 3.7.3.1.4. Suelo vegetal (S)

El suelo vegetal se refiere a la capa superficial que se caracteriza por clasificarse en distintas clases texturales. Las características que conforman el suelo pueden tener un impacto directo en la contaminación del manto acuífero. La presencia de suelos de texturas más finas como limos y arcillas reduce la permeabilidad del suelo, dificultando el movimiento de los contaminantes a través de este, mientras que suelos con texturas más gruesas como arenas y gravas facilitan el transporte de contaminantes al acuífero, haciendo que la

vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas aumente. Según el método DRASTIC, se considera la capa de suelo superficial con un espesor promedio inferior o igual a 1.83 metros (Aller *et al.*, 1987).

La información del suelo vegetal presente en la microcuenca de estudio se obtuvo del *Estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala* (MAGA-DIGEGR, 2017). Haciendo uso del sistema de información geográfica QGIS se procedió a rasterizar la capa tipo archivo *shape* de acuerdo con el parámetro de textura y se reclasificó de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla XVII. **Valor DRASTIC asignado a la litología de la zona no saturada (A)**

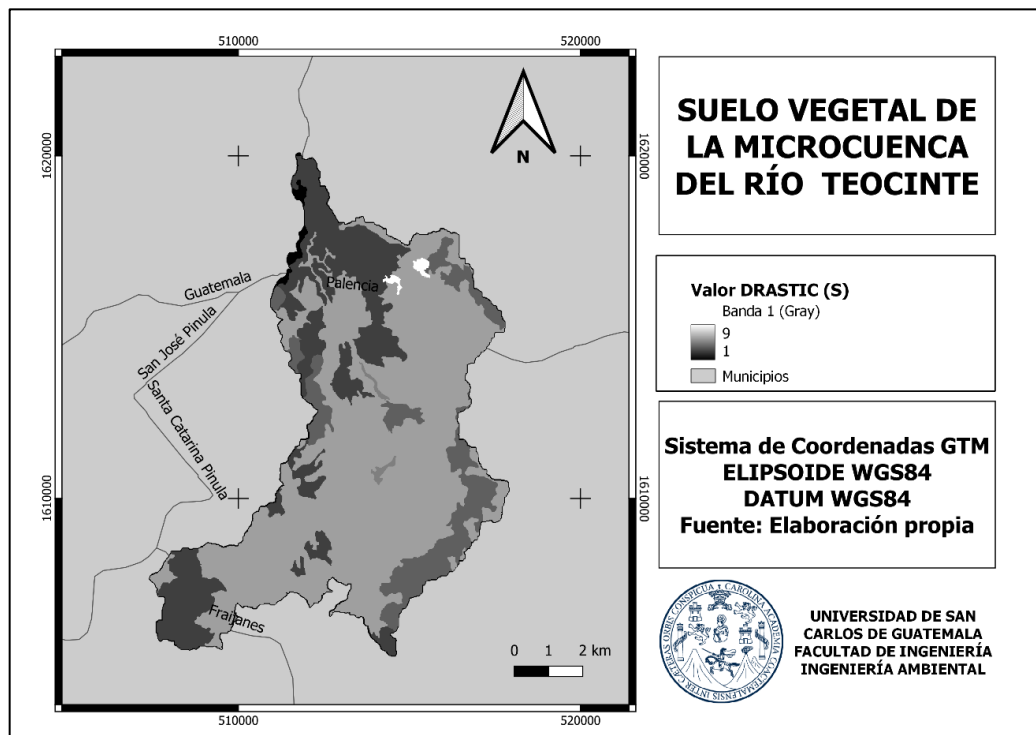
<b>Tipos de suelo</b>	<b>Valor</b>
Arcilla no expansiva ni agregada	1
Suelo orgánico	2
Franco arcilloso	3
Franco limoso	4
Franco	5
Franco arenoso	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Suelo delgado o ausente	10

Fuente: Aller *et al.* (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings: U.S.*

De acuerdo con el *Estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala* (MAGA-DIGEGR, 2017), se identificaron seis principales grupos de textura de suelo, entre los que se encuentran Arena Franca (AF), Arcilla (Ar),

Franco (F), Franco Arenoso (FA), Franco Arcilloso (FAr) y Franco Arcilla Arenosa (FArA).

Figura 18. Mapa de suelo vegetal según DRASTIC



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.10.8.

### 3.7.3.2. Evaluación del índice de las presiones

Es necesario clasificar la intensidad de las presiones existentes en el área de estudio, de acuerdo con los valores resumidos en la tabla XXI, reclasificados a valores entre 1 (muy bajo) y 5 (muy alto).

Se realizó una clasificación de las presiones presentes en la zona de estudio con base en la influencia de actividades antrópicas de cada uso de la

tierra. Según González (2020), se propone un valor de clasificación asignado al uso/cobertura de la tierra respecto a su influencia en contaminación en la microcuenca de estudio, cuyo acuífero pertenece al Acuífero Noreste de la ciudad de Guatemala. Los valores propuestos por González y Celada (2020) se tomaron como el índice de las presiones para la zona de estudio y reclasificaron en valores enumerados del 1 al 5.

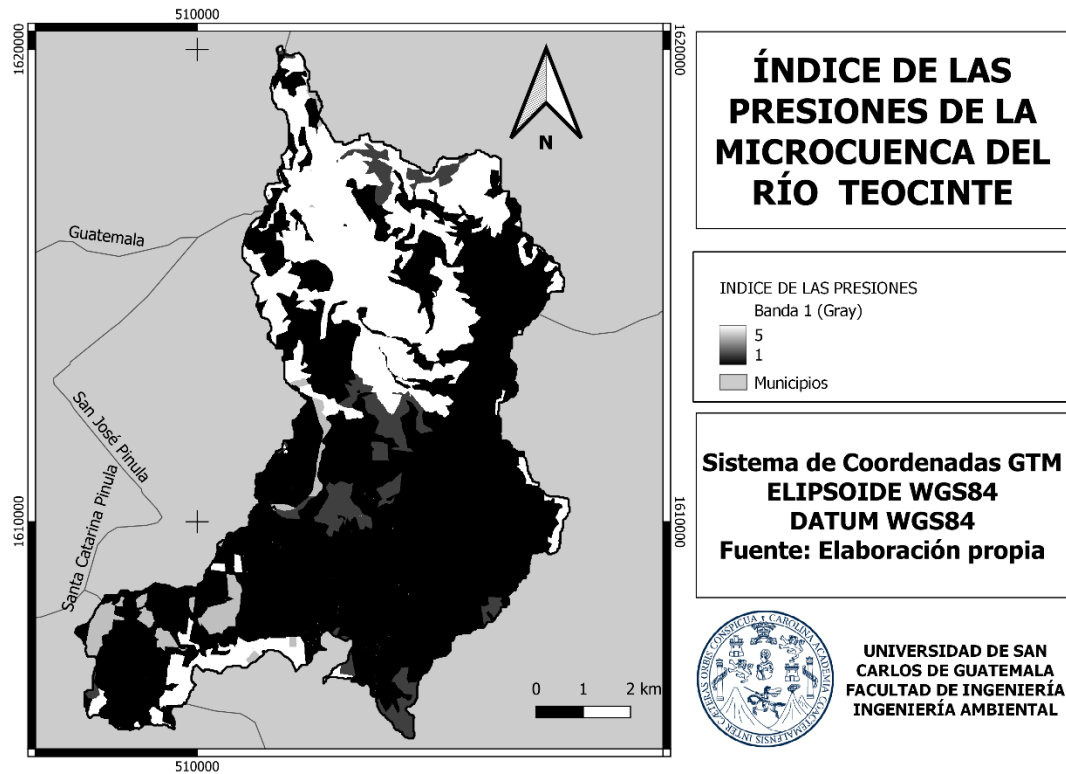
Tabla XVIII. **Resumen de presiones y su intensidad de presión en la microcuenca del río Teocinte. Índice IP**

<b>Presiones</b>	<b>González - Celada (2019)</b>	<b>Valor Reclasificado</b>
Agricultura anual	9	5
Cultivos permanentes herbáceos	5	3
Café	4	2
Bosque	1	1
Cultivos arbóreos	6	3
Pastos	2	1
Guamil-matorral	3	2
Tejido urbano continuo	8	4
Cuerpos de agua	7	4

Fuente: elaboración propia.

Haciendo uso de las herramientas que ofrece el sistema de información geográfica QGIS se procedió a clasificar cada una de las presiones con base en el mapa de uso de suelo elaborado en el presente trabajo de investigación, y se procedió también a convertir la capa de archivo *shape* a un archivo ráster con los valores reclasificados de acuerdo con la tabla XXI.

Figura 19. Índice de las presiones de la microcuenca del río Teocinte



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

### 3.7.3.3. Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas

El riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas se cuantifica por medio del índice RI (Jiménez-Madrid *et al.*, 2013), de acuerdo con una matriz de doble entrada que clasifica las clases de riesgo de muy bajo a muy alto, mediante el producto entre el índice de vulnerabilidad y el índice de la intensidad de las presiones.

Tabla XIX. **Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas**

índice RI		Vulnerabilidad (índice DRASTIC reducido)					Clases de riesgo
		1	2	3	4	5	
índice de las presiones	1	1	2	3	4	5	Muy bajo
	2	2	4	6	8	10	Bajo
	3	3	6	9	12	15	Moderado
	4	4	8	12	16	20	Alto
	5	5	10	15	20	25	Muy alto

Fuente: Jiménez (2012). *La protección del agua subterránea empleada para consumo humano y su integración en la ordenación del territorio.*

#### 3.7.3.4. Clasificación de perímetros de protección

De acuerdo con la tabla XX de evaluación de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, los perímetros de protección se establecerían de la siguiente manera:

Tabla XX. **Perímetros de protección y sus restricciones**

Tipo de perímetros de protección	Restricciones
Restricciones muy altas	No se permiten más actividades
Restricciones altas	Actividades con índice de las presiones entre 0-19
Restricciones moderadas	Actividades con índice de las presiones entre 0-39
Restricciones bajas	Actividades con índice de las presiones entre 0-59
Restricciones muy bajas	Actividades con índice de las presiones entre 0-79

Fuente: Jiménez (2012). *La protección del agua subterránea empleada para consumo humano y su integración en la ordenación del territorio.*

El índice de las presiones para cada actividad puede consultarse en el anexo 3.

### **3.8. Análisis estadístico**

El análisis estadístico se realizó como se describe en el inciso 3.8.1.

#### **3.8.1. Medidas de centro**

Son medidas aplicadas a una serie de datos que ubican el centro de la distribución de las mismas (Mendenhall *et al.*, 2010).

##### **3.8.1.1. Media muestral**

La media aritmética o promedio de un conjunto de  $n$  mediciones es igual a la suma de las mediciones dividida entre  $n$ .

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde:

$\bar{X}$  = media muestra

$\sum x_i$  = suma de todas las mediciones de la variable

$n$  = número de mediciones o muestras

#### **3.8.2. Medidas de variabilidad**

Las medidas de variabilidad indican qué tanto se alejan las series de datos del centro analizado en las medidas de tendencia central (Mendenhall *et al.*, 2010).



### 3.8.2.1. Varianza de una muestra

Es la suma de las desviaciones cuadradas de las mediciones alrededor de la media, dividida entre el número  $n$  de mediciones tomadas menos uno.

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - x)^2}{n-1} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Donde:

$s^2$  = varianza de la muestra.

$\sum(x_i - x)^2$  = suma de las desviaciones cuadradas de las mediciones alrededor de la media.

$n$  = número de mediciones o muestras.

### 3.8.2.2. Desviación muestral estándar

Es la raíz cuadrada de la desviación estándar (Mendenhall *et al.*, 2010).

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

$S$  = desviación muestral estándar

$s^2$  = varianza de la muestra

### 3.8.3. Análisis de máximos y mínimos

Se utilizan para la identificación de datos atípicos o no homogéneos en un rango de datos obtenidos, en el proceso experimental.

### 3.9. Plan de análisis de los resultados

Para el plan de análisis se utilizaron diferentes métodos y modelos, esto de acuerdo al tipo de variables.

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

Para la clasificación e identificación de las unidades de muestreo se utilizará el criterio propuesto por Herrera (2002). Este criterio clasifica las unidades de muestreo de forma cuantitativa, en función del volumen de recarga hídrica natural por unidad de muestreo. La recarga se divide en cuatro clasificaciones de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla XXI. Clasificación de las zonas de recarga hídrica en función del volumen de recarga hídrica natural anual

Rango (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> / año)	Criterio
>300,000	Muy alta
150,000 – 300,000	Alta
50,000 – 150, 000	Media
<50, 000	Baja

Fuente: Herrera (2002). *Hidrogeología práctica*.

#### 3.9.2. Programas a utilizar para el análisis de datos

- Software de sistemas de información geográfica (SIG) QGIS 3.10.8
- Hojas de cálculo electrónicas



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Cuantificación de la recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte

La cuantificación de la recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte se hizo de la siguiente manera.

#### 4.1.1. Información climática

Esta información se presenta en las siguientes tablas y para ello se utilizaron datos del Insivumeh.

Tabla XXII. Precipitación mensual (mm) de la microcuenca del río Teocinte

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
2016	1.10	0.20	3.70	13.60	6.20	186.50	123.90	297.10	319.40	14.90	3.10	2.30	972.00
2017	1.10	4.90	3.50	8.40	372.10	281.50	211.10	201.40	332.90	178.40	1.60	0.40	1597.30
2018	2.40	17.40	26.50	33.20	290.10	339.90	61.50	225.60	269.00	183.80	31.30	4.20	1484.90
2019	0.30	0.70	5.10	71.50	179.20	194.90	176.20	277.20	283.20	530.60	32.80	0.30	1752.00
2020	6.80	4.30	5.80	63.90	141.50	77.00	187.20	215.10	319.50	104.90	146.00	9.30	1281.30
Promedio	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07

Fuente: elaboración propia, empleando datos del Insivumeh.

Tabla XXIII. **Temperatura promedio mensual (°C) de la microcuenca del río Teocinte**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2016	20.07	20.25	23.19	24.13	24.24	22.25	21.94	21.80	21.15	20.82	20.41	20.85
2017	20.07	21.68	21.86	23.40	22.44	21.44	21.49	21.32	21.03	20.40	19.48	18.94
2018	15.80	17.70	18.70	18.50	19.60	19.40	19.30	18.80	19.20	18.60	18.20	16.50
2019	17.40	17.10	18.40	19.01	20.30	19.80	18.90	20.60	19.60	20.40	18.15	18.00
2020	17.60	17.50	18.50	21.20	21.00	19.50	20.10	19.70	19.70	20.40	19.40	17.40
<b>Promedio</b>	18.19	18.85	20.13	21.25	21.52	20.48	20.35	20.45	20.13	20.13	19.13	18.34

Fuente: elaboración propia, empleando datos del Insivumeh.

#### 4.1.2. Cálculo de la infiltración básica

Se realizó un total de 12 pruebas de infiltración para cada unidad de mapeo definida en la tabla XI, obteniendo como resultado las velocidades de infiltración básica presentadas en el siguiente cuadro.

Tabla XXIV. **Infiltración básica del suelo por unidad de mapeo de la microcuenca del río Teocinte**

Unidad de muestreo	Pruebas realizadas	Coordenadas geográficas		Infiltración básica	
		N	W	mm/hora	mm/día
2	1	14° 32' 31.434"	90° 25' 12.6768"	53.401	1281.62
3	1	14° 32' 48.6708 "	90° 24' 08. 5608"	28.044	673.06
4	1	14° 31' 44.274"	90° 25' 05. 808"	45.096	1082.30
5	1	14° 32' 25.1052"	90° 22' 15.996"	44.208	1060.99
6	1	14° 31' 50.2068"	90° 21' 52.848"	57.175	1372.20
7	1	14° 36' 20.8548"	90° 22' 20.2224"	72.387	1737.29
8	1	14° 34' 07.4731"	90°21' 56.4321"	65.886	1581.26
9	1	14° 31' 47.4636"	90° 24' 40.4203"	13.6103	326.65
10	1	14° 35' 08.9052"	90° 23' 07.2816"	45.948	1102.75
11	1	14° 32' 17.844"	90° 21' 22.4856"	8.825	211.80
12	1	14° 35' 36.2292"	90° 22' 22.8648"	100.39	2409.36
13	1	14° 37' 26.6232"	90° 23' 37.0572"	50.072	1201.73

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3. Características físicas de los suelos presentes en la microcuenca del río Teocinte

A partir del *Estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala* se obtuvieron datos de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, dichas características de los suelos son de gran importancia debido a que influyen directamente sobre la velocidad de infiltración y la cantidad de precipitación que recarga el acuífero de la microcuenca de estudio (MAGA-DIGEGR, 2017).

Tabla XXV. **Constantes de humedad y tipo de textura de las unidades de muestreo de la microcuenca del río Teocinte**

Unidad de muestreo	Humedad (%)		Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Granulometría (%)			Textura
	CC	PMP		Arcilla	Limo	Arena	
2	26.46	15.01	1.20	38.76	27.51	33.73	FA
3	14.15	7.27	1.24	13.30	22.70	64.00	FA
4	26.46	15.01	1.20	38.76	27.51	33.73	FAr
5	9.05	4.06	1.02	5.85	10.45	83.69	FA
6	17.58	9.43	1.02	21.14	21.58	57.28	FArA
7	26.46	15.01	1.20	38.76	27.51	33.73	FAr
8	21.59	11.94	0.97	26.05	34.25	39.70	F
9	9.05	4.06	1.07	5.85	10.45	83.69	FA
10	18.49	10.00	1.18	24.45	17.27	58.28	FArA
11	17.71	9.51	0.84	21.40	21.58	57.28	FArA
12	21.59	11.94	0.97	26.05	34.25	39.70	F
13	27.12	15.42	1.06	41.32	24.35	31.30	Ar

Fuente: elaboración propia, empleando datos de: MAGA (2017). *Estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala.*

#### 4.1.4. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial de la microcuenca, calculada por medio del método de Hargreaves, se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla XXVI. **Evapotranspiración potencial de la microcuenca del río Teocinte**

Mes	Temperatura		Radiación extraterrestre		Brillo solar	Humedad	Brillo medio	RSM	ETP
	°C	°F	mm/día	mm/mes	(horas/día)	relativa (%)	mensual (%)		mm/mes
Enero	18.19	64.74	12.30	381.30	11.33	79.21	57.00	215.90	104.83
Febrero	18.85	65.92	13.52	378.56	11.62	76.61	60.46	220.76	109.15
Marzo	20.13	68.24	14.85	460.35	12.00	73.87	63.90	276.00	141.25
Abril	21.25	70.25	15.67	470.10	12.48	75.30	62.12	277.88	146.40
Mayo	21.52	70.73	15.78	489.18	12.78	84.18	49.71	258.68	137.22
Junio	20.48	68.86	15.60	468.00	12.97	88.37	42.63	229.17	118.36
Julio	20.35	68.62	15.60	483.60	12.87	85.38	47.80	250.77	129.06
Agosto	20.45	68.80	15.63	484.53	12.58	87.85	43.57	239.86	123.77
Septiembre	20.13	68.24	15.15	454.50	12.19	90.16	39.22	213.47	109.26
Octubre	20.13	68.23	14.27	442.37	11.80	89.65	40.21	210.40	107.66
Noviembre	19.13	66.43	13.06	391.80	11.42	86.51	45.92	199.12	99.21
Diciembre	18.34	65.01	12.26	380.06	11.23	82.03	52.99	207.49	101.17
Promedio	19.91	67.84	14.47	440.36	12.11	83.26	50.46	233.29	118.95

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Recarga hídrica natural

Haciendo uso de una hoja electrónica de cálculo se procedió a realizar el balance hídrico de suelos para cada una de las unidades de mapeo definidas en la tabla XI (apéndice 5). La siguiente tabla presenta la precipitación, evapotranspiración real, escorrentía superficial, retención debido a la vegetación y la recarga hídrica natural que recibe el acuífero de la microcuenca del río Teocinte.

Tabla XXVII. **Recarga hídrica natural por unidad de mapeo de la microcuenca del río Teocinte**

Unidad de mapeo	Área (m <sup>2</sup> )	Pp (m <sup>3</sup> /año)	ETR (m <sup>3</sup> /año)	Esc (m <sup>3</sup> /año)	Ret (m <sup>3</sup> /año)	Rec (m <sup>3</sup> /año)
1	7,343,000.00	11,059,047.53	0	11,059,047.53	0	0
2	19,538,000.00	29,425,530.53	18,236,404.18	0	6,123,990.72	5,065,135.64
3	8,340,000.00	12,560,596.00	6,865,018.21	739,841.40	1,627,723.36	3,328,019.65
4	5,760,000.00	8,674,944.00	5,246,737.70	0	1,124,183.04	2,304,023.26
5	4,785,000.00	7,206,529.00	4,561,244.39	374,713.35	1,499,810.40	770,767.24
6	4,562,000.00	6,870,676.13	4,545,343.75	0	1,429,913.28	895,419.10
7	3,745,000.00	5,640,219.67	3,340,377.90	0	730,914.15	1,568,927.62
8	3,268,000.00	4,921,825.87	2,914,914.55	0	637,817.74	1,369,093.58
9	2,946,000.00	4,436,872.40	2,475,646.69	106,861.34	574,972.78	1,279,391.59
10	2,140,000.00	3,222,982.67	1,906,180.18	0	417,665.23	899,137.26
11	1,950,000.00	2,936,830.00	1,804,383.54	0	380,582.80	751,863.66
12	1,254,000.00	1,888,607.60	1,118,513.72	0	244,744.02	525,349.86
13	1,112,000.00	1,674,746.13	1,059,713.04	0	348,545.28	266,487.81
14	1,038,000.00	1,563,297.20	945,505.86	0	202,587.15	415,204.19
15	922,000.00	1,388,593.47	821,041.97	0	179,947.35	387,604.14
16	931,000.00	1,402,148.07	849,395.51	0	181,703.89	371,048.67
17	581,000.00	875,024.73	494,036.86	0	113,394.16	267,593.72
18	150,000.00	225,910.00	140,007.20	0	47,016.00	38,886.80
19	68,000.00	102,412.53	66,620.36	0	21,313.92	14,478.25
20	309,000.00	465,374.60	277,500.86	0	60,307.74	127,566.00
21	210,000.00	316,274.00	185,807.99	0	40,985.84	89,480.17
<b>Total</b>	<b>70,952,000.00</b>	<b>106,858,442.13</b>	<b>57,854,394.46</b>	<b>12,280,463.62</b>	<b>15,988,118.85</b>	<b>20,735,478.21</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3. Clasificación de zonas de recarga hídrica

Se clasificó cada una de las zonas de mapeo tomando en cuenta un criterio cuantitativo de acuerdo con la lámina de agua que cada unidad de mapeo aporta a la recarga, utilizando la clasificación descrita en la tabla XIV.



Tabla XXVIII. **Clasificación de las zonas de recarga hídrica natural de la microcuenca del Río Teocinte**

Unidad de mapeo	Área (km <sup>2</sup> )	Recarga hídrica natural anual		Clase
		mm	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	
1	7.343	0.00	0.00	Sin Recarga
2	19.538	259.25	259,245.35	Alta
3	8.34	399.04	399,043.12	Muy alta
4	5.76	400.00	400,004.04	Muy alta
5	4.785	161.08	161,079.88	Alta
6	4.562	196.28	196,277.75	Alta
7	3.745	418.94	418,939.28	Muy alta
8	3.268	418.94	418,939.28	Muy alta
9	2.946	434.28	434,280.92	Muy alta
10	2.14	420.16	420,157.60	Muy alta
11	1.95	336.36	385,571.11	Muy alta
12	1.254	418.94	418,939.28	Muy alta
13	1.112	239.65	239,647.31	Alta
14	1.038	400.00	400,004.04	Muy alta
15	0.922	420.39	420,394.95	Muy alta
16	0.931	411.04	398,548.52	Muy alta
17	0.581	460.57	460,574.39	Muy alta
18	0.15	259.25	259,245.35	Alta
19	0.068	212.92	212,915.43	Alta
20	0.309	412.83	412,834.96	Muy alta
21	0.21	426.10	426,096.05	Muy alta

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Balance hídrico de suelos

En la tabla XXIX se presenta la tabulación del balance hídrico de suelos de la microcuenca del río Teocinte.

Tabla XXIX. **Balance hídrico de suelos de la microcuenca del río Teocinte**

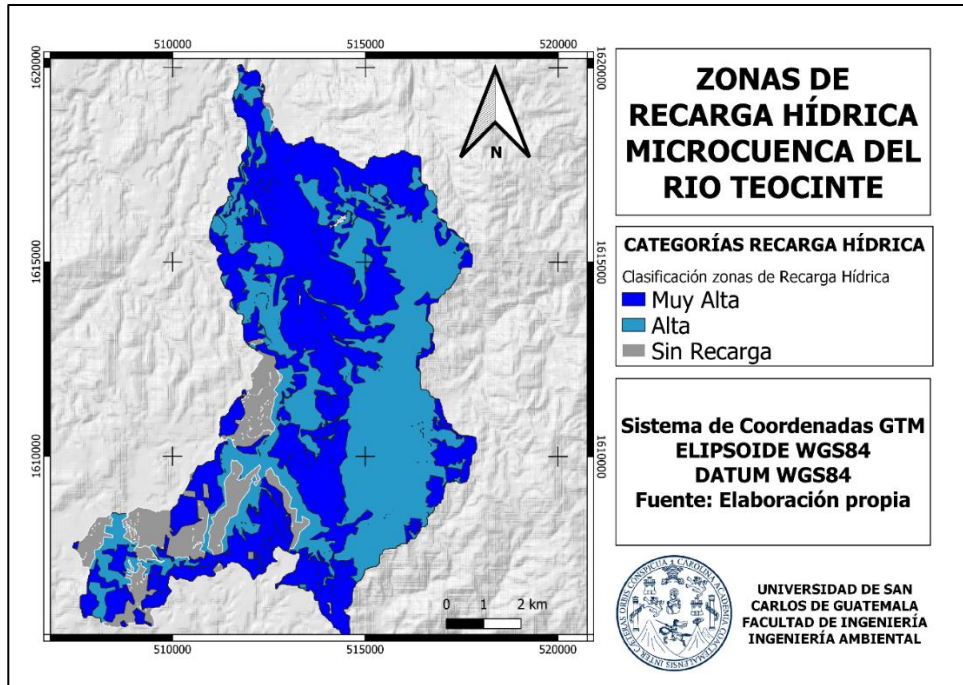
<b>Entrada</b>		<b>Salidas</b>	
<b>Concepto</b>	<b>m<sup>3</sup>/año</b>	<b>Concepto</b>	<b>m<sup>3</sup>/año</b>
<b>Precipitación</b>	106,858,442.13	<b>ETR</b>	106,858,442.13
		<b>ESC</b>	12,280,463.62
		<b>RET</b>	15,988,118.84
		<b>Rh</b>	20,735,478.21
<b>Sumatoria</b>	<b>106,858,442.13</b>	<b>Sumatoria</b>	<b>106,858,455.10</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.5. **Mapa de zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte**

La figura 17 muestra la clasificación de las zonas de recarga hídrica natural de acuerdo con la clasificación realizada en la tabla XIV. Se encontró que en la microcuenca existen tres tipos de zonas de recarga hídrica: la zona de recarga hídrica natural clasificada como muy alta abarca un 47.1 % (33.4 km<sup>2</sup>) de la microcuenca en estudio, mientras que la zona clasificada como alta ocupa un 42.6 % (30.2 km<sup>2</sup>) y las zonas que no reciben recarga hídrica natural ocupan un 10.3 % (7.3 km<sup>2</sup>) de la zona de estudio.

Figura 20. **Mapa de zonas de recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte**



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

#### 4.6. **Delimitación de los perímetros de protección de la microcuenca del río Teocinte**

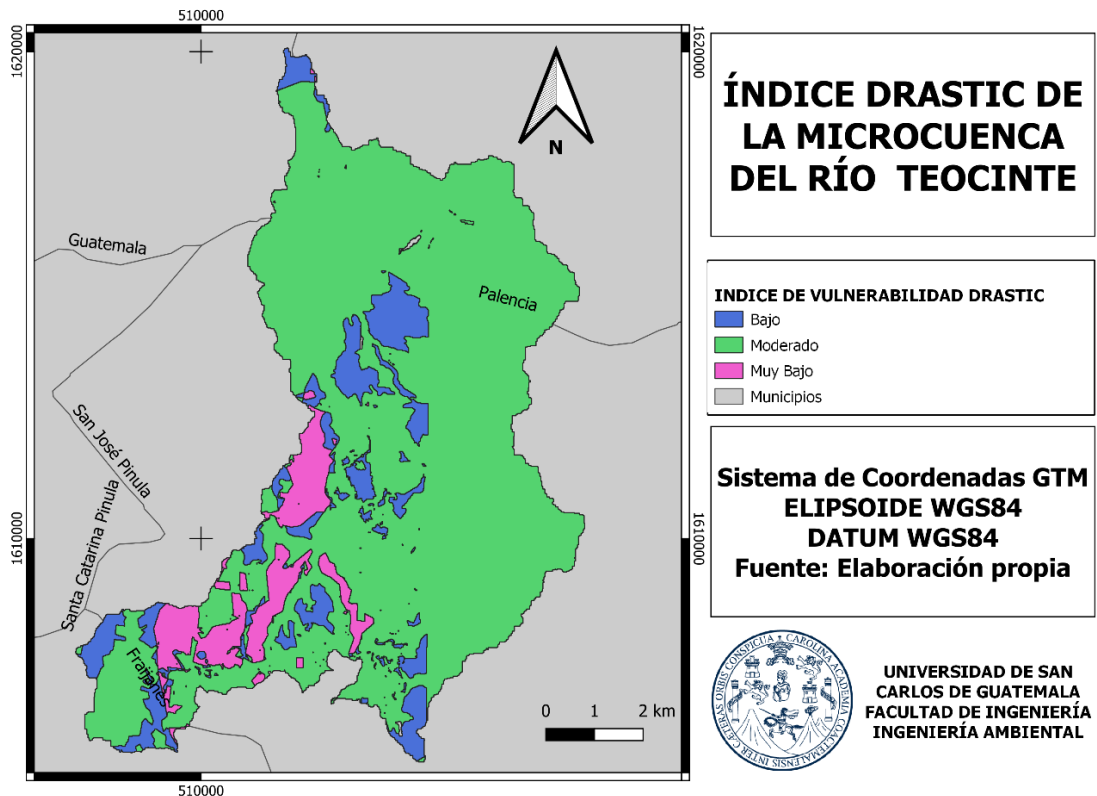
En los siguientes incisos se describe la delimitación de los perímetros de protección de la microcuenca del Río Teocinte:

##### 4.6.1. **Vulnerabilidad espacial a la contaminación utilizando el método DRASTIC reducido**

La figura 18 muestra la distribución espacial de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Teocinte,

en la que se pueden identificar 3 clasificaciones según el índice DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002). Se identificó que el acuífero tiene una zona de vulnerabilidad moderada que abarca el 80.6 % de la microcuenca en estudio (57.3 km<sup>2</sup>), la zona de vulnerabilidad baja abarca el 11.8 % del área en estudio (8.3 km<sup>2</sup>) y la zona de vulnerabilidad muy baja comprende el 7.6 % (5.396 km<sup>2</sup>) del área.

Figura 21. **Distribución espacial de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Teocinte**

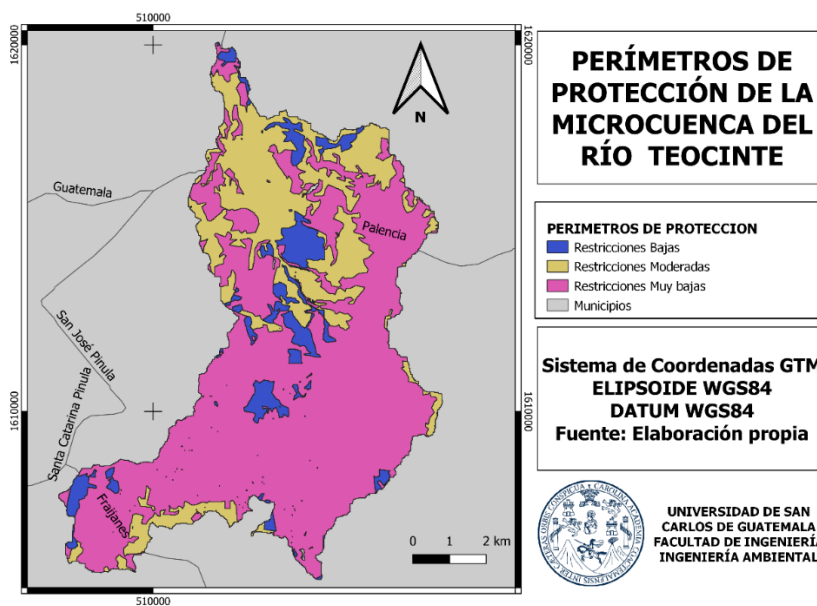


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.10.8.

#### 4.6.2. Delimitación de perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte

La figura 19 muestra los perímetros de protección y sus restricciones, obtenidas a partir de la matriz de doble entrada entre el índice de las presiones presentes en la microcuenca del río Teocinte y el índice de vulnerabilidad DRASTIC reclasificado. Se obtuvo tres clases de perímetros de protección, predominando el del tipo en el que se establecen restricciones muy bajas, que abarca un 67.4 % (47.9 km<sup>2</sup>) de la microcuenca en estudio. Los perímetros de protección que establecen restricciones bajas ocupan un 8.02 % (5.7 km<sup>2</sup>) del área y los perímetros de protección que establecen restricciones moderadas cubren un 24.6 % (17.5 km<sup>2</sup>) de la microcuenca.

Figura 22. **Perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica y sus restricciones de la microcuenca del río Teocinte**



Fuente: elaboración propia, empleando QGis 3.10.8.

## **5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

### **5.1. Cuantificación de la recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte**

En los siguientes incisos se describe la cuantificación de la recarga hídrica natural de la microcuenca del río Teocinte.

#### **5.1.1. Información climática**

La información climática para la estación de San José Pinula, que se encuentra en la microcuenca del río Teocinte, muestra datos para un periodo de 5 años, entre 2016 y 2020, con registros de promedios mensuales para la precipitación pluvial, temperatura y humedad relativa.

La precipitación anual promedio calculada para el periodo analizado en la estación San José Pinula es de 1,506.07 mm. Los meses más lluviosos son mayo (203.60 mm), junio (203.93 mm), agosto (239.30 mm), septiembre (290.57 mm) y octubre (273.10 mm), mientras que los meses más secos son enero (3.17 mm), febrero (7.47 mm), marzo (12.47 mm) y diciembre (4.60 mm).

La temperatura promedio mensual calculada para la microcuenca del río Teocinte es de 18.24 °C. Los meses que presentan mayor temperatura son abril (21.25 °C), mayo (21.52 °C) y junio (20.48 °C). También se puede observar que los meses más fríos son enero (18.19 °C) y diciembre (18.34 °C). La humedad relativa media anual reportada para este periodo es de 83.26 %.

### **5.1.2. Cálculo de la infiltración básica**

La infiltración del agua en los suelos de la microcuenca del río Teocinte varía de 211.80 mm/día en suelos franco arcilloso arenosos hasta 2,409.36 mm/día para suelos francos. Las tasas de infiltración para la microcuenca en general pueden considerarse como altas, debido a que el porcentaje de granulometría presente en los suelos tiene en su mayoría arenas y limos, es decir granos de mayor tamaño que facilitan el movimiento del agua a través del suelo. Las tasas de infiltración encontradas favorecen el proceso de recarga hídrica natural y es un factor determinante para que el agua proveniente de la precipitación, y que no ha sido interceptada por la vegetación, llegue al manto freático.

### **5.1.3. Características físicas de los suelos muestreados**

La densidad aparente de los suelos varía de 0.84 g/cm<sup>3</sup> a 1.24 g/cm<sup>3</sup>, observándose principalmente texturas francas. Se pueden encontrar arenas, francas, franco arenosas a franco arcillosas. Se observan texturas arcillosas en menor medida, principalmente en la parte baja de la microcuenca que se encuentra al norte y franco arcillosa arenosas en la parte alta de la microcuenca que en su mayoría está cubierta por bosque. Las texturas arcillosas muestran como resultado tasas de infiltración más bajas y por ende disminuyen el potencial de recarga hídrica de los suelos.

## **5.2. Recarga hídrica natural y clasificación de zonas de recarga hídrica**

Establecidas las unidades de mapeo que resultan del traslape de los mapas de textura del suelo, cobertura vegetal y pendientes, se determinaron 21

unidades de mapeo para el cálculo de la recarga hídrica. La tabla XXVIII muestra los valores de lámina de agua que recargan el acuífero, en la que es posible encontrar que existe una unidad de mapeo clasificada como un área sin recarga, esto se debe que el área analizada es impermeable. Esto resulta porque las actividades antropogénicas que han provocado un cambio de uso del suelo han cubierto la superficie natural del mismo. En esta área, la precipitación que recibe la misma se convierte en su totalidad en escorrentía que drena hacia el alcantarillado y luego descarga en la red hídrica de la microcuenca.

Los valores más altos de recarga hídrica se calcularon para las unidades de mapeo 17 y 21 (tabla XXVII), con valores de 460.57 y 426.10 mm/año, respectivamente, en las que se encuentran texturas de suelo del tipo franco arenosa y arenosa. Aunque la cobertura del suelo son cultivos anuales, los cuales poseen un potencial de recarga hídrica bajo, la precipitación anual, las tasas de infiltración, el bajo porcentaje de intercepción de la precipitación debido a la cobertura vegetal y las pendientes (plana y algo plana), favorecen el proceso de recarga hídrica natural del acuífero, convirtiendo las unidades descritas en su clasificación de muy alta recarga hídrica.

Los valores de recarga hídrica más bajos calculados para la microcuenca en estudio fueron los que resultan del balance hídrico de suelos de las unidades 5 y 6 (tabla XXVI), con valores de 161.08 y 196.28 mm/año, respectivamente, en los que se encuentran texturas de suelo del tipo franco arcillo-arenosas y franco arcillosas. La cobertura del suelo de dichas unidades (bosque) favorece el proceso de infiltración del agua proveniente de la precipitación, sin embargo, factores como el alto porcentaje de intercepción de la precipitación debido a la cobertura vegetal, una textura de suelo más fina y las pendientes pronunciadas



(pendiente fuerte), hacen que la recarga hídrica potencial de estas unidades de mapeo disminuya.

La distribución general de la clasificación de zonas de recarga hídrica (figura 17) muestra que en la microcuenca del río Teocinte se encuentran tres clasificaciones de recarga: muy alta, alta y sin recarga.

Se observa que las zonas clasificadas como de muy alta recarga hídrica se distribuyen principalmente en las unidades de mapeo que tienen cobertura vegetal de pastizales y cultivos anuales, con pendientes clasificadas como muy planas, planas y algo planas. Estas características de las unidades de muestreo favorecen el proceso de infiltración y por ende el proceso de recarga hídrica natural hacia el acuífero.

Las zonas clasificadas como de alta recarga hídrica se distribuyen principalmente en las partes altas de la microcuenca, en las que la cobertura vegetal es mayoritariamente bosque, con pendientes de terreno que son en su mayoría fuertes y algo fuertes. Las características principales de estas unidades de mapeo producen que la intercepción debido a la cobertura vegetal (bosque) sea alta y que exista un mayor porcentaje de precipitación que se convierte en escorrentía debido a la topografía del terreno.

### **5.3. Balance hídrico de suelos**

Se realizó un balance hídrico de suelos para la microcuenca del río Teocinte. El balance de suelos es una herramienta importante para la descripción de las entradas y salidas del agua en la microcuenca y para la cuantificación del recurso hídrico con el que cuenta la misma.

Como se observa en la tabla XXIX de los resultados, se considera como única entrada de agua hacia la microcuenca la precipitación. El volumen total de agua que ingresa a la microcuenca es de 1061 858,442.13 metros cúbicos.

La precipitación que ingresa a la microcuenca y alcanza su superficie pasa por una serie de fenómenos naturales que están condicionados por características climáticas, edáficas, topográficas y vegetativas. Para la microcuenca del río Teocinte, el 54.14 % de la precipitación recibida sale en forma de evapotranspiración (571 854,394.46 m<sup>3</sup>/año). Esto se debe principalmente a que las temperaturas templadas con las que cuenta la microcuenca producen un volumen considerable que sale de la misma en forma de evaporación. Gran parte de la microcuenca está cubierta por bosque, pastizal y cultivos anuales, por lo que el volumen de agua que abandona la misma por transpiración de la vegetación también es considerable.

El 11.49 % de la precipitación de entrada a la microcuenca sale de la misma en forma de escorrentía (121 280,463.62 m<sup>3</sup>/año). Las tasas de infiltración base, calculadas para las clases texturales de suelos que se encuentran en el área de estudio, dan como resultado balances hídricos para la mayoría de las unidades de mapeo en que la escorrentía es baja o nula. La escorrentía de la microcuenca de estudio es producida en su mayoría por la precipitación que cae en áreas impermeables, que se encuentran en la parte alta de la misma.

La lluvia retenida por el follaje de la vegetación presente en las unidades de mapeo de la microcuenca de estudio representa 14.96 % de toda la precipitación que ingresa a la misma (151 988,118.84 m<sup>3</sup>/año). De acuerdo con la metodología propuesta por Schosinsky (2006), el porcentaje de precipitación que es retenida por las áreas provistas de bosque es el 20 %, mientras que

para follajes de otro tipo de vegetación es del 12 %. La microcuenca del río Teocinte cuenta con una cobertura forestal que supera la mitad del área total, por lo que los volúmenes de precipitación retenidos por los follajes son considerables.

La recarga hídrica para la microcuenca de estudio representa el 19.40 % de las salidas de agua que provienen de la precipitación (201 735,478.21 m<sup>3</sup>/año). El porcentaje de lluvia que se convierte en agua subterránea es alto, esto es debido a las altas tasas de infiltración con las que cuenta la microcuenca del río Teocinte, en las que encontramos suelos que, en su mayoría, tienen mayores porcentajes de granos gruesos (arenas y limos), lo que facilita el paso del agua que va desde la superficie hasta el manto freático.

#### **5.4. Perímetros de protección**

En el inciso 5.4.1. se explica a detalle los perímetros de protección necesarios.

##### **5.4.1. Distribución espacial a la vulnerabilidad por medio del índice DRASTIC reducido**

De acuerdo con los resultados obtenidos, por medio de las 5 variables evaluadas, estas fueron reclasificadas según la metodología DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002), para la asignación de una clasificación de vulnerabilidad. La vulnerabilidad moderada predomina ocupando un 80.6 % de la superficie del acuífero (57.3 km<sup>2</sup>), ocupando las zonas altas de la microcuenca y las zonas bajas cercanas al punto de aforo en que se forma el valle de esta. La zona de vulnerabilidad baja comprende el 11.8 % de la superficie del acuífero (8.3 km<sup>2</sup>), ocupando en su mayoría la parte

media de la cuenca en que se encuentra el valle central. La zona de muy baja vulnerabilidad, ocupando un 7.6 % del área en estudio (5.396 km<sup>2</sup>), está distribuida principalmente en la zona suroeste de la microcuenca.

La distribución espacial a la vulnerabilidad para la microcuenca del río Teocinte, de acuerdo con el índice DRASTIC reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002), puede clasificarse en 3 clases: vulnerabilidad muy baja, baja y moderada. El factor de mayor peso para la ecuación que clasifica la vulnerabilidad es la profundidad a la que se encuentra el acuífero. De acuerdo con los muestreos realizados en los pozos que se encuentran dentro y en los alrededores de la microcuenca de estudio, se puede observar que el manto freático se encuentra a una profundidad que es clasificada con valores de 1 a 3, de acuerdo con la metodología utilizada. Esto quiere decir que el factor de espesor de la zona no saturada redujo el valor del índice de vulnerabilidad.

La zona de vulnerabilidad moderada es la que predomina para la microcuenca del río Teocinte, lo que permite el paso a contaminantes móviles y persistentes en un lapso mediano. La profundidad del acuífero fue el factor que redujo en mayor porcentaje el índice de vulnerabilidad para la zona en cuestión, sin embargo, la presencia de rocas volcánicas fracturadas, de suelos de textura franco-arenosa y los valores altos de recarga hídrica de la microcuenca en general, contribuyeron a aumentar el índice de vulnerabilidad, dándole valores que la clasifican como una zona de vulnerabilidad moderada.

La zona de baja vulnerabilidad se debe a que esta área se caracteriza por aquellas zonas de alta profundidad del agua, con materiales litológicos que dificultan el movimiento del agua a través de este (rocas ígneas y metamórficas). La profundidad elevada del agua y el material litológico, con

características poco permeables, funcionan como elementos atenuantes de la carga contaminante, y junto a la baja conductividad hidráulica contribuyen a disminuir el índice de vulnerabilidad a la contaminación.

La zona de vulnerabilidad muy baja se encuentra distribuida principalmente en el suroeste de la microcuenca en estudio. Los valores altos de profundidad, el tipo de litología en la zona (rocas ígneas y metamórficas) y la baja o nula recarga hídrica, debido a la impermeabilización del suelo, causada por las actividades antropogénicas, hacen que el movimiento del agua a través de la zona no saturada hacia el acuífero se dificulte, haciendo que la vulnerabilidad del acuífero disminuya en gran medida.

#### **5.4.2. Delimitación de perímetros de protección de las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte**

La figura 19 de los resultados muestra la delimitación de perímetros de protección y las actividades permitidas, con la metodología propuesta aplicada en la microcuenca del río Teocinte. De acuerdo con los resultados obtenidos, el 67.4 % del territorio de la microcuenca en estudio constituye un perímetro de protección en que se permiten restricciones muy bajas, y el 8.02 % del área se clasifica con restricciones bajas, esto es debido a que en la mayor parte del área se establecen actividades ya existentes que tienen un índice de las presiones clasificado como bajo, y es posible encontrar bosques, cultivo de café y pastos.

El 24.6 % del territorio de la microcuenca en estudio está clasificado como perímetro de protección con restricciones moderadas, es decir que se permite la realización de actividades con una intensidad de presión baja o muy baja. El producto de la matriz de doble entrada para esta área dio como

resultados valores más elevados respecto al área restante de estudio debido a que ya se encuentran actividades que cuentan con un índice de las presiones más alto, entre las que es posible encontrar cultivos anuales o tejido urbano continuo.

La vulnerabilidad del acuífero en general no representa valores altos, por lo que, al realizar la matriz de doble entrada, se obtiene una clasificación de perímetros de protección que no superan las restricciones moderadas.



## CONCLUSIONES

1. Se dividió la microcuenca del río Teocinte en 21 unidades de mapeo para el cálculo del balance hídrico de suelos, resultantes de la intersección de los polígonos de textura del suelo, cobertura vegetal y pendientes. La microcuenca en estudio se caracteriza por contener suelos de texturas gruesas que facilitan la infiltración del agua proveniente de la precipitación pluvial. Es importante mencionar que la topografía del área en estudio presenta en su mayoría pendientes fuertes. Respecto a la cobertura vegetal, se observa un porcentaje considerable de área que aún es bosque, y también se encuentran pastizales, cultivos anuales y zonas impermeables que se han formado por el cambio de uso del suelo debido a las actividades antropogénicas.
2. Se determinó la recarga hídrica potencial que se produce en la microcuenca del río Teocinte y se estimó en  $201735,478.21 \text{ m}^3/\text{año}$ . El balance hídrico de suelos muestra que los valores más altos de recarga se obtuvieron en las unidades de mapeo 17 y 21, cuyas texturas de suelo son franco arenosa y franca, respectivamente. Su topografía es clasificada como algo plana y promedio, y la cobertura vegetal son cultivos anuales.
3. Se clasificaron las principales zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte en función del volumen de recarga hídrica específica anual de cada unidad de mapeo. Se encontró que existen tres tipos de zonas de recarga hídrica: la zona de recarga hídrica natural clasificada como muy alta abarca un 47.1 % de la microcuenca en



estudio (33.4 km<sup>2</sup>), mientras que la zona clasificada como alta ocupa un 42.6 % del área en estudio (30.2 km<sup>2</sup>), y las zonas que no reciben recarga hídrica natural ocupan un 10.3 % de la zona (7.3 km<sup>2</sup>).

4. Se delimitaron tres clases de perímetros de protección para las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte, predominando el tipo en el que se establecen restricciones muy bajas, que abarca un 67.4 % de la microcuenca en estudio. Los perímetros de protección que establecen restricciones bajas ocupan un 8.02 % del área, mientras que los perímetros de protección que establecen restricciones moderadas cubren un 24.6 % de la microcuenca.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un plan de manejo para las zonas de recarga hídrica identificadas en la microcuenca del río Teocinte, utilizando como base los perímetros de protección que proponen una serie de actividades permitidas para asegurar la calidad del recurso hídrico subterráneo.
2. Establecer planes de ordenamiento territorial para propiciar un crecimiento organizado de las zonas urbanas, evitando la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo de la microcuenca del río Teocinte.
3. Conformar un comité de microcuenca comunal, que incluya la participación de actores principales de la población, autoridades municipales y organizaciones locales, cuyo objetivo principal sea la implementación de acciones para el manejo adecuado de los recursos naturales, incluyendo las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Teocinte.
4. Realizar una identificación de zonas de recarga hídrica haciendo uso de distintas metodologías, utilizando el recurso humano, tecnológico y con una inversión de tiempo mayor, con el objetivo de obtener resultados más fiables para la gestión del recurso hídrico subterráneo de la microcuenca del río Teocinte.
5. Realizar estudios hidrogeológicos a detalle para la microcuenca del río Teocinte, para establecer perímetros de protección para las fuentes de

captación de aguas subterráneas y zonas de salvaguarda para el acuífero de la zona en estudio.

6. Aplicar el método DRASTIC para la determinación de la distribución espacial de la vulnerabilidad potencial a la contaminación del acuífero de la microcuenca del río Teocinte, de manera que se puedan obtener datos más confiables del riesgo a la polución de las aguas subterráneas (Aller *et al.*, 1987).

## REFERENCIAS

1. Aller L., Bennett T., Lehr J., Petty R., Hackett G. (1987) *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. Florida, United States: Environmental Protection Agency Report.
2. Alvarado, C. y Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración utilizados para el cálculo del balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 9(1), 23–33. Recuperado de: <https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1674>.
3. Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J. A., Carrasco, F., Durán, J. y Jiménez, P. (2004). Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115(2), 177–186.
4. Basterrechea, M. y Noriega, A. G. (2019). *Recursos hídricos*. México D.F.: Autor.
5. Bermúdez-Vásquez, M., Granados-Chinchilla, F. y Molina, A. (2019). Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Psidium guajava* and *Cymbopogon citratus*. *Agronomy Mesoamerican*, 30(1), 147–163. Recuperado de <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.33758>

6. Bocuti, E., Amorim, R., Raimo, L., Magalhães, W. y Azevedo, E. (2020). Effective hydraulic conductivity and its relationship with the other attributes of Cerrado soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 1(1), 357–363.
7. Domínguez-Pérez, F. y Mercado-Fernández, T. (2020). Potential infiltration and morphometry in the arroyo grande basin, sucre Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 96(1), 21–31. Recuperado de <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191043>
8. Funcagua. (2018). *Plan de conservación del agua*. Ciudad de Guatemala: Autor.
9. Iarna-Universidad Rafael Landívar. (2005). *Situación del recurso hídrico en Guatemala. Documento técnico del perfil ambiental de Guatemala*. Ciudad de Guatemala: URL.
10. Jodar-Abellan, A., Ruiz, M. y Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240–253. Recuperado de <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
11. Matus, O. (2007). Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. *Escuela de Posgrado - Programa de Educación Para El Desarrollo y La Conservación Del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Magister S,*

1(1), 121. Recuperado de  
<http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle>

12. Mendenhall, W., Beaver, R. y Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Cengage Learning. Recuperado de [http://investigadores.cide.edu/aparicio/data/refs/Mendenhall\\_Prob\\_Estadistica\\_13.pdf%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/84261/78536109X\\_TFG\\_14968419448316659365465685192362.pdf?sequence=2](http://investigadores.cide.edu/aparicio/data/refs/Mendenhall_Prob_Estadistica_13.pdf%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/84261/78536109X_TFG_14968419448316659365465685192362.pdf?sequence=2)
13. Montero-Sánchez, E., Herrera-Murillo, J. y Ramírez-Granados, P. (2018). Sensibilidad y escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Porrosatí, Heredia, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(62), 52. Recuperado de <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.3>
14. Orozco, E. (2011). Vulnerabilidad intrínseca del acuífero del valle de Chimaltenango, altiplano central de Guatemala. Impactos preliminares de su gestión integrada. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 42–47.
15. Peñuela, A. y Carrillo, R. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, 81, 18–32. Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/30518/41962>

16. Ríos, N., Andrade, H. e Ibrahim, M. (2008). Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 183–186.
17. Schosinsky, N. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34(35), 13–30. Recuperado de <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
18. Simon, A. (2019). El ciclo del agua. *Revista de Obras Públicas*, 166(3606), 60–67. Recuperado de <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1993.2.66839>
19. Técnica. (2011). *Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral de recurso hídrico*. Lima, Perú: Autor.
20. Vera, C. y Camilloni, I. (2010). Ciencias Naturales. El ciclo del agua. *E. Explora*, 1(1), 2–5. Recuperado de <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002315.pdf>

## APÉNDICE

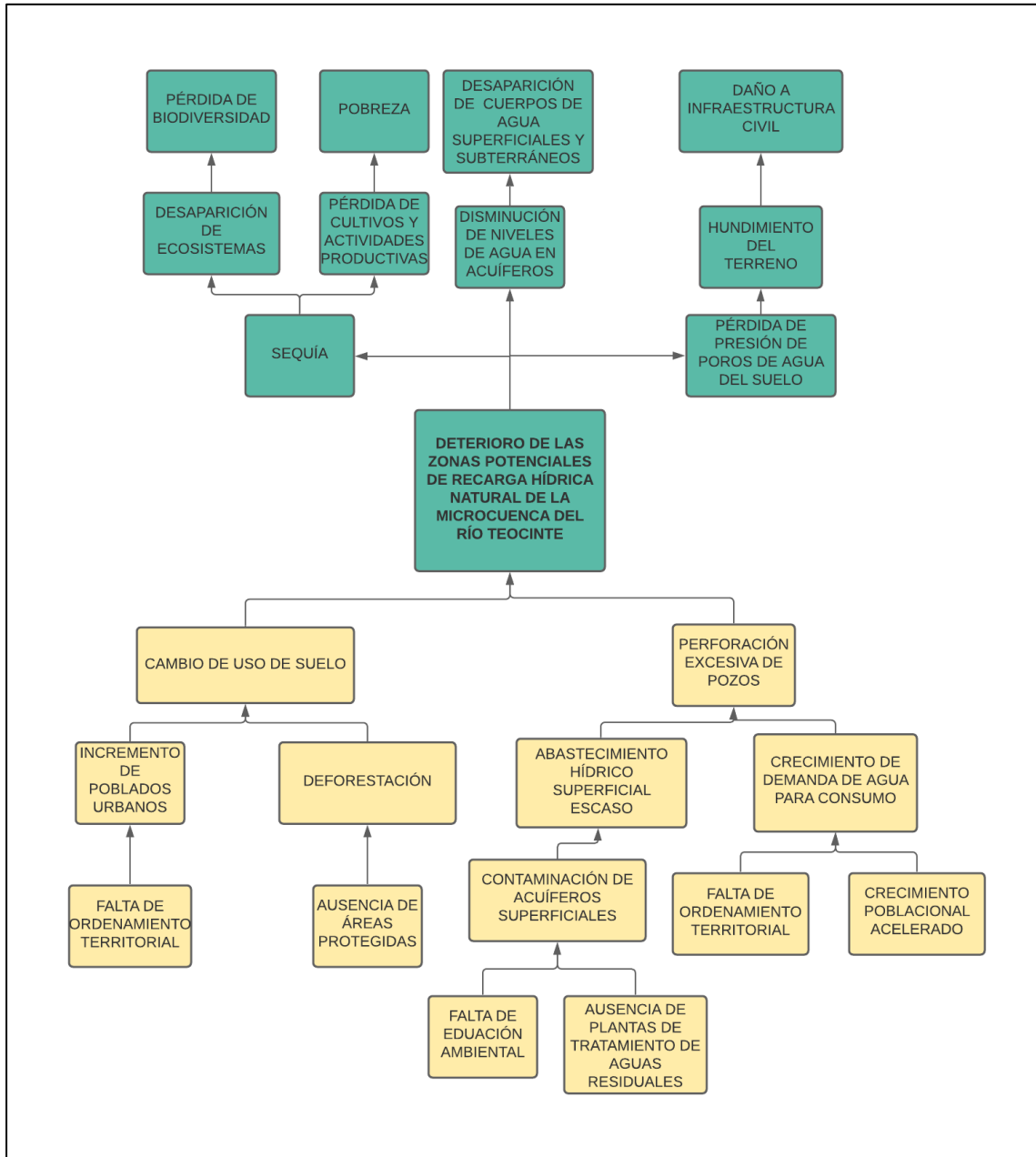
Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Ambiental	Aguas	Hidrología	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterización de la microcuenca</li> <li>• Balance hídrico de suelos</li> </ul>
		Aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas subterráneas y acuíferos</li> </ul>
		Manejo de cuencas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recarga hídrica natural</li> </ul>
	Materiales	Mecánica de suelos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación de suelos</li> </ul>
	Básica	Geografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de coordenadas</li> </ul>
		Estadística	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestreo</li> <li>• Análisis estadístico de los datos</li> </ul>
	Complementaria	Climatología	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis climatológico estadístico</li> <li>• Precipitación</li> <li>• Evapotranspiración</li> </ul>
	Dibujo y Topografía	Topografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curvas de nivel</li> <li>• Cartografía</li> <li>• Fotografías aéreas</li> </ul>
		Sistemas de Información geográfica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digitalización de la información</li> <li>• Elaboración de mapas</li> <li>• Caracterización de cuencas</li> </ul>
	Sanitaria	Geología	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geología de los acuíferos</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

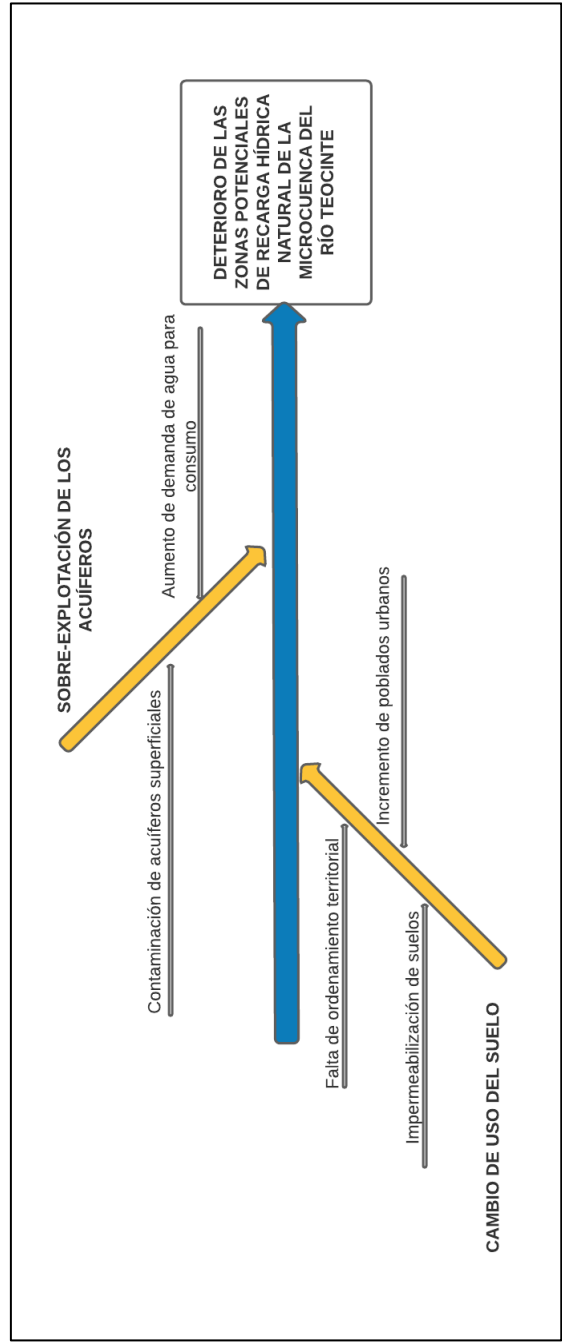


## Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart 2021.

Apéndice 3. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart 2021.

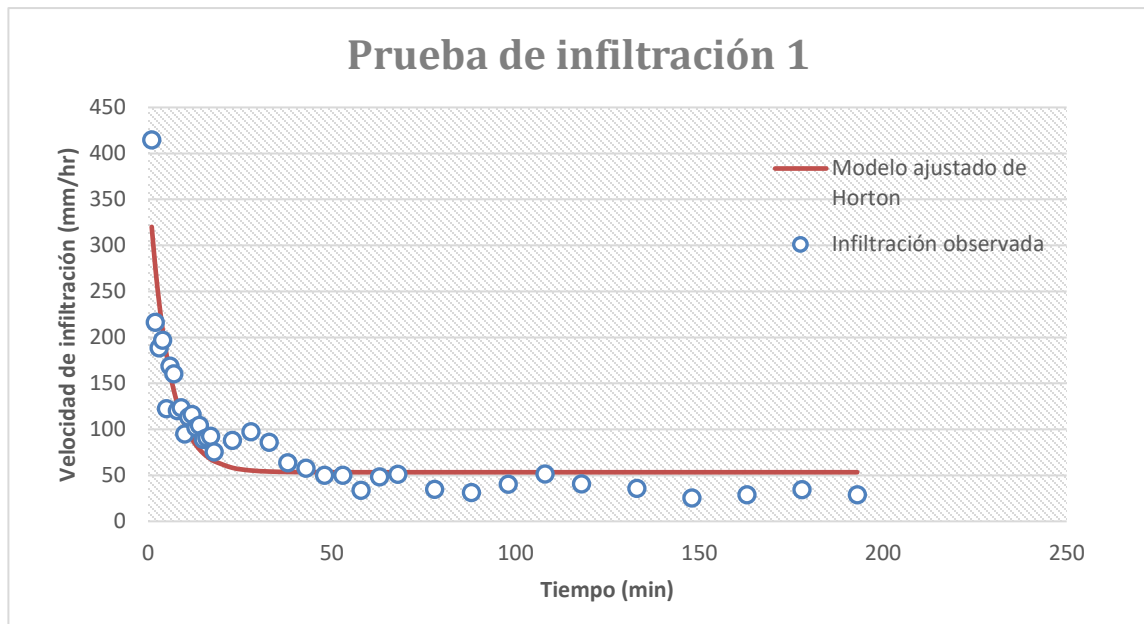
Apéndice 4. Pruebas de infiltración

Unidad de muestreo: 2		Coordenadas:	N 14° 32` 31.434"	
			W 90° 25` 12.6768"	
Textura del suelo: franco arcillosa		Diámetro: 30 cm		
Uso: bosque		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hora)
0	0	27.00	0.00	0.00
1	1	23.30	0.69	414.99
1	2	21.50	0.36	216.62
1	3	20.00	0.31	188.84
1	4	18.50	0.33	197.11
1	5	17.60	0.20	122.55
1	6	16.40	0.28	168.77
1	7	15.30	0.27	160.47
1	8	14.50	0.20	120.41
1	9	13.70	0.21	123.72
1	10	13.10	0.16	95.07
1	11	12.40	0.19	113.52
1	12	11.70	0.19	116.46
1	13	11.10	0.17	102.28
1	14	10.50	0.17	104.66
1	15	10.00	0.15	89.11
1	16	9.50	0.15	90.91
1	17	9.00	0.15	92.79
1	18	8.60	0.13	75.63
5	23	6.40	0.15	88.07
5	28	4.20	0.16	97.63
0	28	26.70	TM	TM
5	33	22.90	0.14	86.00
5	38	20.30	0.11	63.96
5	43	18.10	0.10	57.91
5	48	16.30	0.08	50.32
5	53	14.60	0.08	50.26
5	58	13.50	0.06	34.08
5	63	12.00	0.08	48.66
5	68	10.50	0.09	51.44

Continuación del apéndice 4.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hora)
10	78	8.60	0.06	34.84
10	88	7.00	0.05	31.59
10	98	5.10	0.07	40.65
0	98	27.50	TM	TM
10	108	22.90	0.09	51.55
10	118	19.60	0.07	40.99
15	133	15.70	0.06	35.88
15	148	13.20	0.04	25.48
15	163	10.60	0.05	29.02
15	178	7.80	0.06	34.75
15	193	5.70	0.05	28.99

Apéndice 5. Velocidad de infiltración de unidad de mapeo 2



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Prueba de infiltración 2

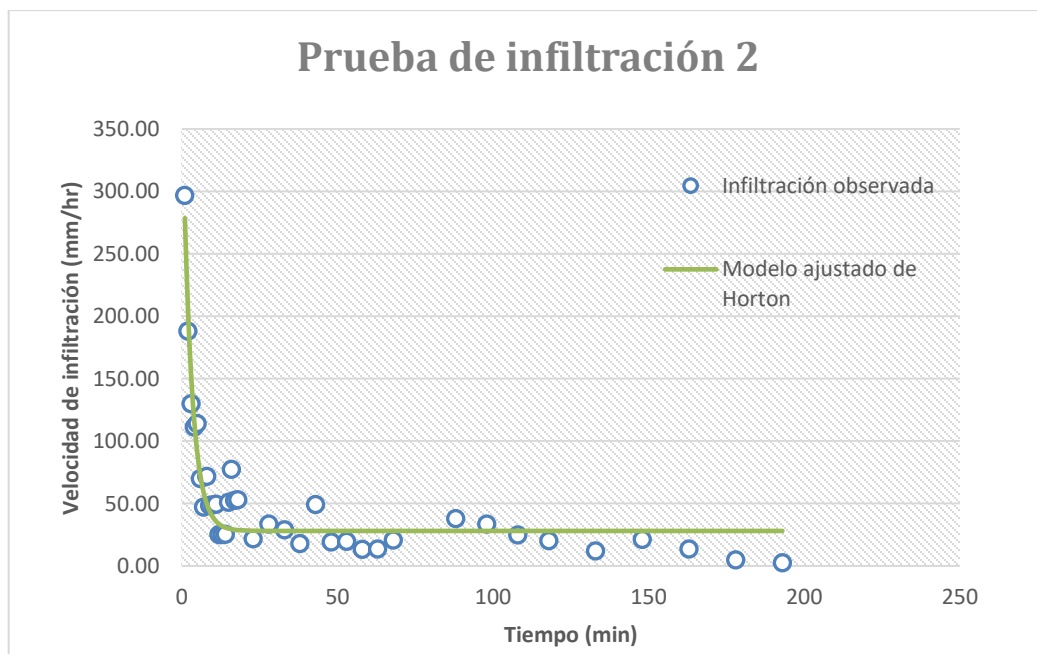
<b>Unidad de muestreo: 3</b>		<b>Coordenadas:</b>	<b>N 14° 32` 48.6708 "</b>	
			<b>W 90° 24` 08.5608"</b>	
<b>Textura del suelo: franco arenosa</b>		<b>Diámetro: 30 cm</b>		
<b>Uso: pastizal</b>		<b>Profundidad: 30 cm</b>		
<b>Intervalo (min)</b>	<b>Acumulado (min)</b>	<b>Lectura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/hora)</b>
0	0	16.00	0.00	0.00
1	1	14.50	0.49	296.81
1	2	13.60	0.31	187.96
1	3	13.00	0.22	129.82
1	4	12.50	0.19	111.12
1	5	12.00	0.19	113.93
1	6	11.70	0.12	69.77
1	7	11.50	0.08	47.12
1	8	11.20	0.12	71.62
1	9	11.00	0.08	48.39
1	10	10.80	0.08	48.91
1	11	10.60	0.08	49.45
1	12	10.50	0.04	24.93
1	13	10.40	0.04	25.07
1	14	10.30	0.04	25.21
1	15	10.10	0.08	50.85
1	16	9.80	0.13	77.37
1	17	9.60	0.09	52.33
1	18	9.40	0.09	52.94
5	23	9.00	0.04	21.56
5	28	8.40	0.06	33.34
5	33	7.90	0.05	28.76
5	38	7.60	0.03	17.71
5	43	6.80	0.08	48.99
5	48	6.50	0.03	19.08
5	53	6.20	0.03	19.50
5	58	6.00	0.02	13.24
5	63	5.80	0.02	13.43
5	68	5.50	0.03	20.53
TM	68	20.00	TM	TM

Continuación del apéndice 6.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f (mm/hora)
10	78	12.30	0.25	147.83
10	88	10.70	0.06	37.92
10	98	9.40	0.06	33.35
10	108	8.50	0.04	24.63
10	118	7.80	0.03	20.13
15	133	7.20	0.02	12.00
15	148	6.20	0.04	21.14
15	163	5.60	0.02	13.44
15	178	5.40	0.01	4.62
15	193	5.30	0.00	2.33

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 7. Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 3



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Prueba de infiltración 3

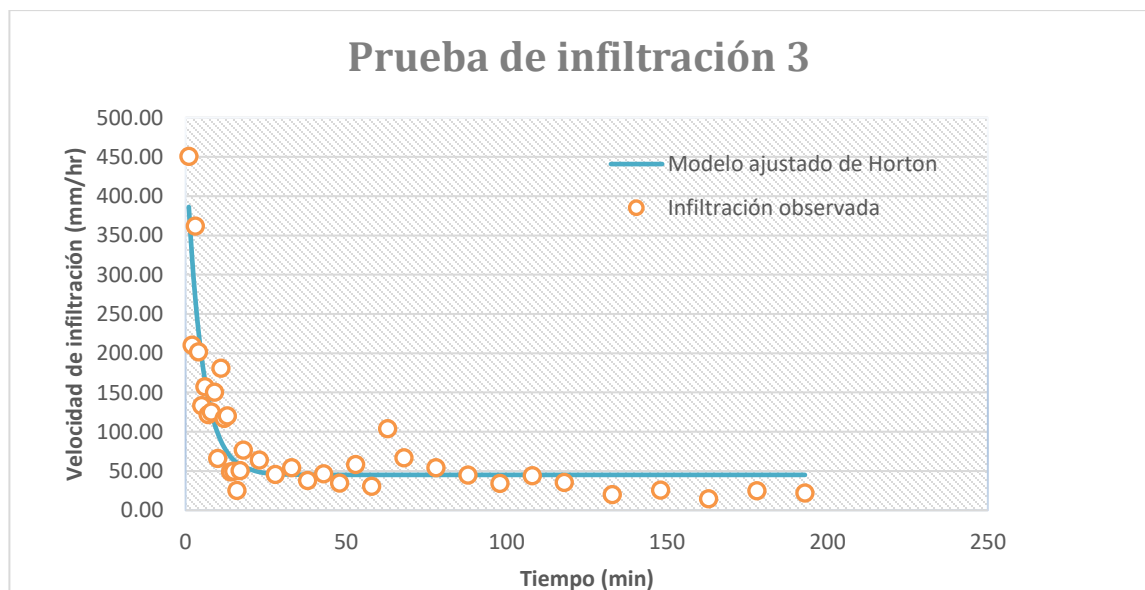
Unidad de muestreo: 4		Coordenadas:	N 14° 31' 44.274"	
			W 90° 25' 05.808"	
Textura del suelo: franco arcillosa		Diámetro: 30 cm		
Uso: pastizal		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/hora)	f (mm/hora)
0	0	24.00	0.00	0.00
1	1	21.00	0.75	450.38
1	2	19.70	0.35	210.09
1	3	17.60	0.60	361.57
1	4	16.50	0.34	201.66
1	5	15.80	0.22	133.20
1	6	15.00	0.26	157.22
1	7	14.40	0.20	121.63
1	8	13.80	0.21	125.01
1	9	13.10	0.25	150.37
1	10	12.80	0.11	66.02
1	11	12.00	0.30	180.93
1	12	11.50	0.19	116.89
1	13	11.00	0.20	120.01
1	14	10.80	0.08	48.91
1	15	10.60	0.08	49.45
1	16	10.50	0.04	24.93
1	17	10.30	0.08	50.28
1	18	10.00	0.13	76.49
5	23	8.80	0.11	63.93
5	28	8.00	0.08	45.29
5	33	7.10	0.09	53.84
5	38	6.50	0.06	37.77
5	43	5.80	0.08	46.16
5	48	5.30	0.06	34.49
5	53	4.50	0.10	58.08
5	58	4.10	0.05	30.51
TM	58	25.60	TM	TM
5	63	22.00	0.17	103.63
5	68	19.90	0.11	66.46

Continuación del apéndice 8.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/hora)	f (mm/hora)
10	78	16.80	0.09	54.03
10	88	14.50	0.07	44.75
10	98	12.90	0.06	33.98
10	108	11.00	0.07	43.99
10	118	9.60	0.06	35.41
15	133	8.50	0.03	19.95
15	148	7.20	0.04	25.42
15	163	6.50	0.02	14.64
15	178	5.40	0.04	24.55
15	193	4.50	0.04	21.70

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 9. Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 4



Fuente: elaboración propia.



Apéndice 10. Prueba de infiltración 4

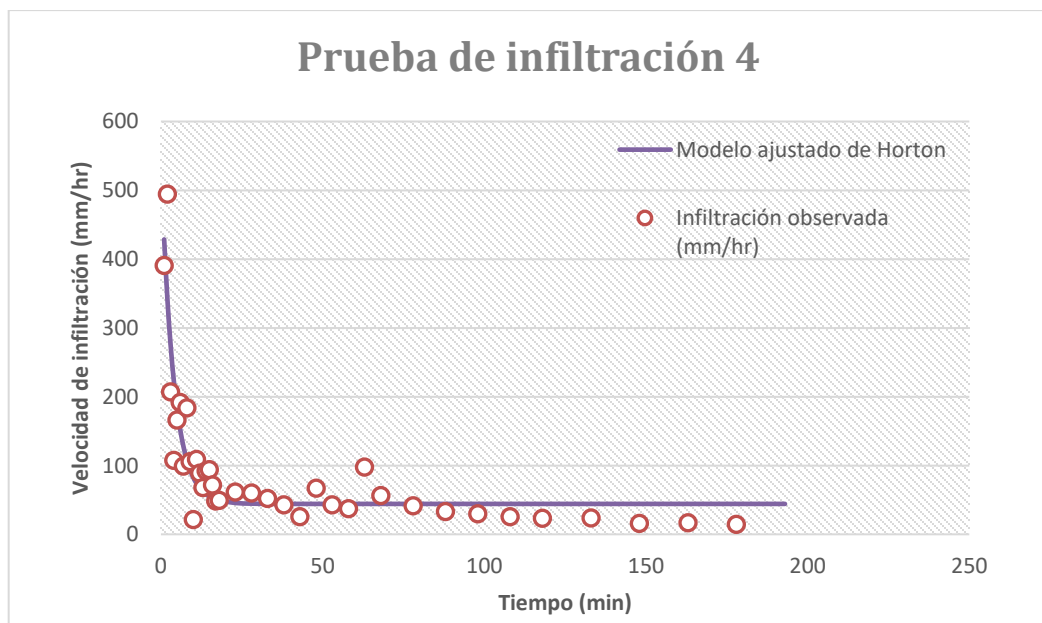
Unidad de muestreo: 5		Coordenadas:	N 14° 32` 25.1052"	
			W 90° 22` 15.996"	
Textura del suelo: franco arenosa		Diámetro: 30 cm		
Uso: bosque		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f(cm/min)	f(mm/hr)
0	0	25.00	0.00	0.00
1	1	22.30	0.65	390.29
1	2	19.20	0.82	494.30
1	3	18.00	0.34	206.93
1	4	17.40	0.18	107.15
1	5	16.50	0.28	165.66
1	6	15.50	0.32	191.52
1	7	15.00	0.16	98.91
1	8	14.10	0.31	183.70
1	9	13.60	0.18	105.39
1	10	13.50	0.04	21.38
1	11	13.00	0.18	108.44
1	12	12.60	0.15	88.67
1	13	12.30	0.11	67.67
1	14	11.90	0.15	91.84
1	15	11.50	0.16	93.75
1	16	11.20	0.12	71.62
1	17	11.00	0.08	48.39
1	18	10.80	0.08	48.91
5	23	9.60	0.10	61.04
5	28	8.50	0.10	59.84
5	33	7.60	0.09	52.10
5	38	6.90	0.07	42.72
5	43	6.50	0.04	25.35
5	48	5.50	0.11	66.70
5	53	4.90	0.07	42.53
5	58	4.40	0.06	37.04
TM	58	27.60	TM	TM
5	63	24.00	0.16	97.39
5	68	22.10	0.09	55.99

Continuación del apéndice 10.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f(cm/min)	f(mm/hr)
10	78	19.50	0.07	41.37
10	88	17.60	0.05	32.84
10	98	16.00	0.05	29.64
10	108	14.70	0.04	25.61
10	118	13.60	0.04	22.87
15	133	12.00	0.04	23.66
15	148	11.00	0.03	15.79
15	163	10.00	0.03	16.67
15	178	9.20	0.02	14.04
15	193	8.20	0.03	18.52

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 11. Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 5



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12.

Prueba de infiltración 5

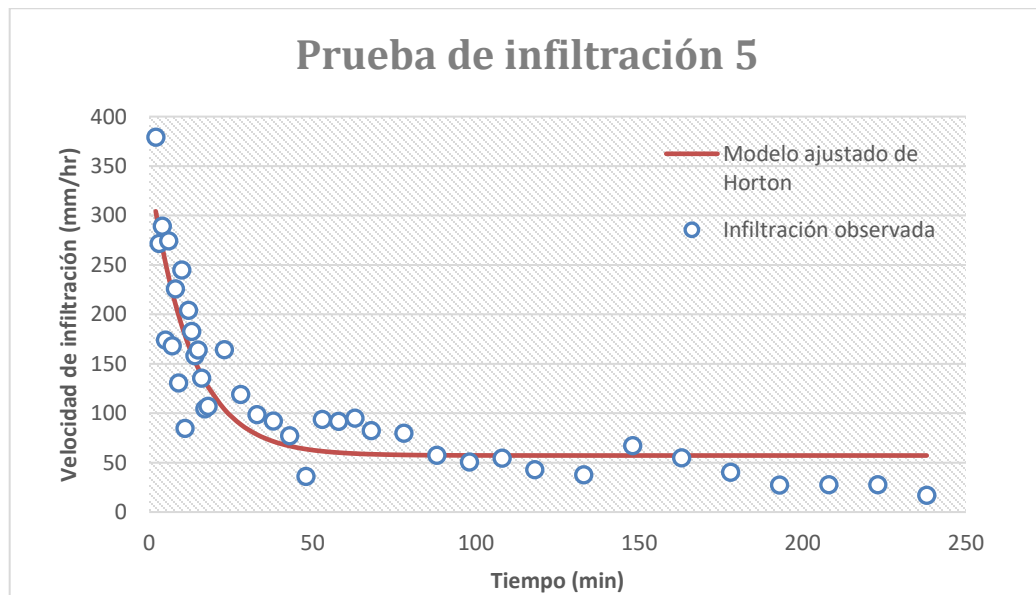
<b>Unidad de muestreo: 6</b>		<b>Coordenadas:</b>	<b>N 14° 31` 50.2068"</b>	
			<b>W 90° 21` 52.848"</b>	
<b>Textura del suelo: franco arcillosa arenosa</b>		<b>Diámetro: 30 cm</b>		
<b>Uso: pastizal</b>		<b>Profundidad: 30 cm</b>		
<b>Intervalo (min)</b>	<b>Acumulado (min)</b>	<b>Lectura (cm)</b>	<b>f(cm/min)</b>	<b>f(mm/hr)</b>
0	0	25.00	0.00	0.00
1	1	22.30	0.65	390.29
1	2	19.20	0.82	494.30
1	3	18.00	0.34	206.93
1	4	17.40	0.18	107.15
1	5	16.50	0.28	165.66
1	6	15.50	0.32	191.52
1	7	15.00	0.16	98.91
1	8	14.10	0.31	183.70
1	9	13.60	0.18	105.39
1	10	13.50	0.04	21.38
1	11	13.00	0.18	108.44
1	12	12.60	0.15	88.67
1	13	12.30	0.11	67.67
1	14	11.90	0.15	91.84
1	15	11.50	0.16	93.75
1	16	11.20	0.12	71.62
1	17	11.00	0.08	48.39
1	18	10.80	0.08	48.91
5	23	9.60	0.10	61.04
5	28	8.50	0.10	59.84
5	33	7.60	0.09	52.10
5	38	6.90	0.07	42.72
5	43	6.50	0.04	25.35
5	48	5.50	0.11	66.70
5	53	4.90	0.07	42.53
5	58	4.40	0.06	37.04
TM	58	27.60	TM	TM
5	63	24.00	0.16	97.39

Continuación del apéndice 12.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f(cm/min)	f(mm/hr)
5	68	22.10	0.09	55.99
10	78	19.50	0.07	41.37
10	88	17.60	0.05	32.84
10	98	16.00	0.05	29.64
10	108	14.70	0.04	25.61
10	118	13.60	0.04	22.87
15	133	12.00	0.04	23.66
15	148	11.00	0.03	15.79
15	163	10.00	0.03	16.67
15	178	9.20	0.02	14.04
15	193	8.20	0.03	18.52

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 6**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Prueba de infiltración 6

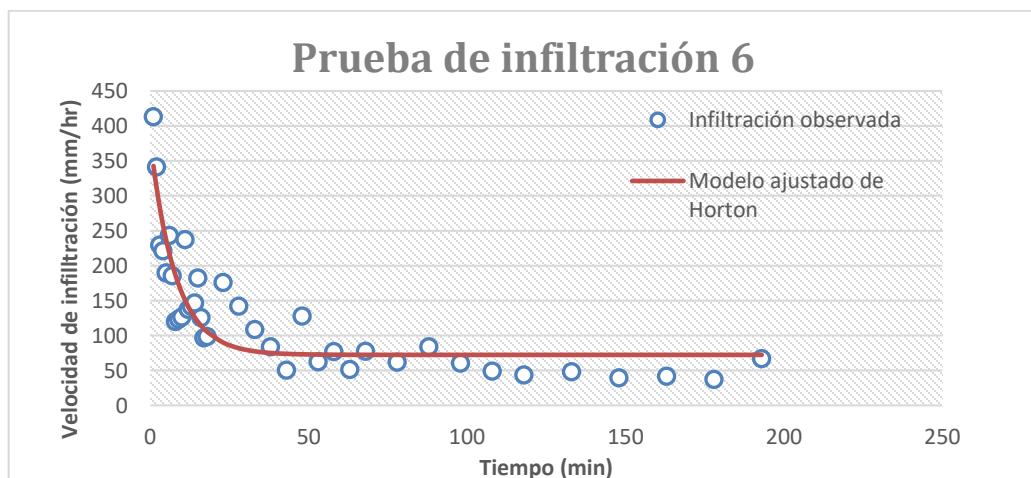
<b>Unidad de muestreo: 7</b>		<b>Coordenadas:</b>	<b>N 14° 36` 20.8548"</b>	
			<b>W 90° 22` 20.2224"</b>	
<b>Textura del suelo: franco arcillosa</b>		<b>Diámetro: 30 cm</b>		
<b>Uso: cultivos anuales</b>		<b>Profundidad: 30 cm</b>		
<b>Intervalo (min)</b>	<b>Acumulado (min)</b>	<b>Lectura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/hr)</b>
0	0	21.00	0	0
1	1	18.50	0.69	413.13
1	2	16.60	0.57	341.48
1	3	15.40	0.38	229.84
1	4	14.30	0.37	221.52
1	5	13.40	0.32	189.72
1	6	12.30	0.41	243.30
1	7	11.50	0.31	185.59
1	8	11.00	0.20	120.01
1	9	10.50	0.21	123.30
1	10	10.00	0.21	126.77
1	11	9.10	0.40	237.59
1	12	8.60	0.23	137.63
1	13	8.10	0.24	141.97
1	14	7.60	0.24	146.59
1	15	7.00	0.30	182.46
1	16	6.60	0.21	125.88
1	17	6.30	0.16	96.78
1	18	6.00	0.16	98.91
5	23	3.60	0.29	176.17
TM	23	29.50	TM	TM
5	28	24.10	0.24	141.98
5	33	20.50	0.18	108.86
5	38	18.00	0.14	84.17
5	43	16.60	0.08	50.82
5	48	13.40	0.21	128.22

Continuación del apéndice 14.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f (mm/hr)
5	53	12.00	0.10	62.40
5	58	10.40	0.13	77.05
5	63	9.40	0.09	51.74
5	68	8.00	0.13	77.83
10	78	6.00	0.10	62.17
10	88	3.70	0.14	84.05
TM	88	25.70	TM	TM
10	98	21.50	0.10	60.86
10	108	18.50	0.08	49.14
10	118	16.10	0.07	43.58
15	133	12.60	0.08	48.16
15	148	10.10	0.07	39.85
15	163	7.80	0.07	42.01
15	178	6.00	0.06	37.55
15	193	3.30	0.11	66.94

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 15. Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 7



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Prueba de infiltración 7

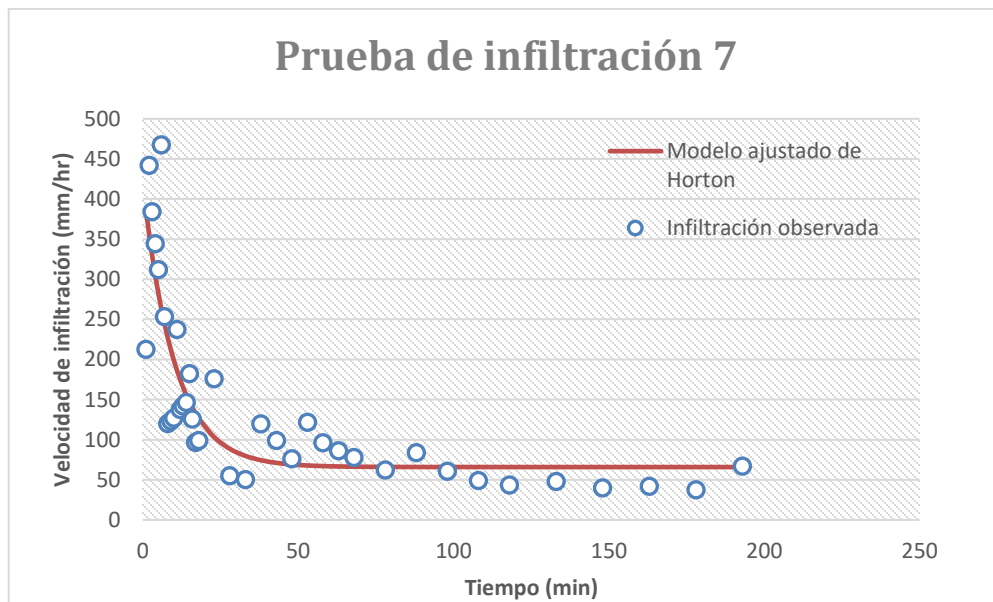
Unidad de muestreo: 8		Coordenadas:	N 14° 36` 20.8548"	
			W 90° 22` 20.2224"	
Textura del suelo: franca		Diámetro: 30 cm		
Uso: pastizal		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/min)
0	0	25.00	0.00	0.00
1	1	23.50	0.35	212.64
1	2	20.60	0.74	441.98
1	3	18.30	0.64	384.28
1	4	16.40	0.57	344.23
1	5	14.80	0.52	311.81
1	6	12.60	0.78	467.40
1	7	11.50	0.42	253.26
1	8	11.00	0.20	120.01
1	9	10.50	0.21	123.30
1	10	10.00	0.21	126.77
1	11	9.10	0.40	237.59
1	12	8.60	0.23	137.63
1	13	8.10	0.24	141.97
1	14	7.60	0.24	146.59
1	15	7.00	0.30	182.46
1	16	6.60	0.21	125.88
1	17	6.30	0.16	96.78
1	18	6.00	0.16	98.91
5	23	3.60	0.29	176.17
TM	23	29.50	TM	TM
5	28	27.30	0.09	55.17
5	33	25.40	0.08	50.53
5	38	21.30	0.20	119.79
5	43	18.30	0.17	99.00
5	48	16.20	0.13	76.41
5	53	13.20	0.20	121.81
5	58	11.10	0.16	96.27
5	63	9.40	0.14	86.26
5	68	8.00	0.13	77.83

Continuación del apéndice 16.

Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/min)
10	78	6.00	0.10	62.17
10	88	3.70	0.14	84.05
TM	88	25.70	TM	TM
10	98	21.50	0.10	60.86
10	108	18.50	0.08	49.14
10	118	16.10	0.07	43.58
15	133	12.60	0.08	48.16
15	148	10.10	0.07	39.85
15	163	7.80	0.07	42.01
15	178	6.00	0.06	37.55
15	193	3.30	0.11	66.94

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 8**



Fuente: elaboración propia.



Apéndice 18. Prueba de infiltración 8

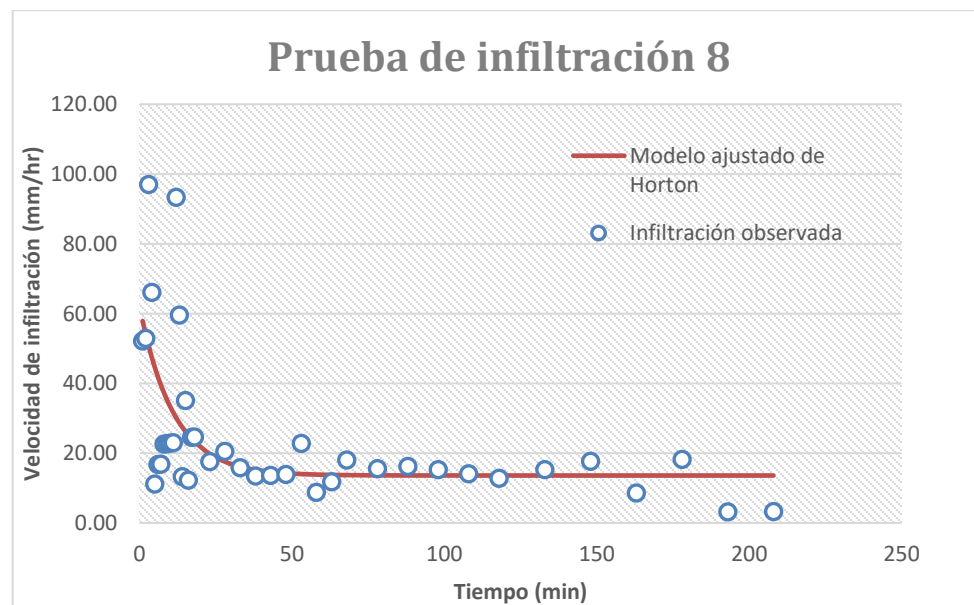
Unidad de muestreo: 9		Coordenadas:	N 14° 31` 47.4636"	
			W 90° 24` 40.4203"	
Textura del suelo: franca		Diámetro: 25 cm		
Uso: pastizal		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hr)
0	0	30.00	0.00	0.00
1	1	29.50	0.09	52.08
1	2	29.00	0.09	52.82
1	3	28.10	0.16	96.99
1	4	27.50	0.11	66.08
1	5	27.40	0.02	11.13
1	6	27.25	0.03	16.75
1	7	27.10	0.03	16.83
1	8	26.90	0.04	22.56
1	9	26.70	0.04	22.69
1	10	26.50	0.04	22.83
1	11	26.30	0.04	22.97
1	12	25.50	0.16	93.32
1	13	25.00	0.10	59.53
1	14	24.89	0.02	13.22
1	15	24.60	0.06	35.09
1	16	24.50	0.02	12.18
1	17	24.30	0.04	24.47
1	18	24.10	0.04	24.63
5	23	23.40	0.03	17.50
5	28	22.60	0.03	20.51
5	33	22.00	0.03	15.76
5	38	21.50	0.02	13.39
5	43	21.00	0.02	13.64
5	48	20.50	0.02	13.89
5	53	19.70	0.04	22.77
5	58	19.40	0.01	8.72
5	63	19.00	0.02	11.79
5	68	18.40	0.03	18.04
10	78	17.40	0.03	15.53

Continuación del apéndice 18.

Intervalo (min)	Acumulado (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hr)
10	88	16.40	0.03	16.20
10	98	15.50	0.03	15.20
10	108	14.70	0.02	14.05
10	118	14.00	0.02	12.74
15	133	12.80	0.03	15.27
15	148	11.50	0.03	17.67
15	163	10.90	0.01	8.60
15	178	9.70	0.03	18.13
15	193	9.50	0.01	3.15
15	208	9.30	0.01	3.19

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 8**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. Prueba de infiltración 9

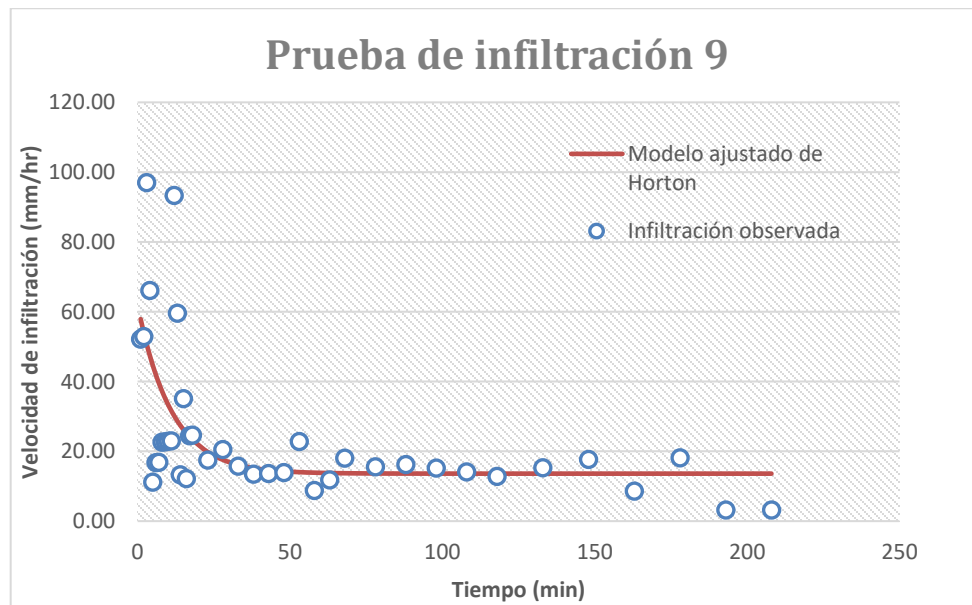
Unidad de muestreo: 10		Coordenadas:	N 14° 35` 08.9052"	
Textura del suelo: franco arenosa arcillosa		Diámetro: 25 cm		
Uso: cultivos		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f(cm/min)	f(mm/hora)
0	0	32.10	0.00	0.00
1	1	30.80	0.22	129.32
1	2	29.60	0.21	123.47
1	3	28.50	0.19	116.86
1	4	27.60	0.16	98.40
1	5	26.60	0.19	112.45
1	6	25.80	0.15	92.45
1	7	25.00	0.16	94.79
1	8	24.20	0.16	97.25
1	9	23.20	0.21	125.22
1	10	22.70	0.11	64.21
1	11	22.00	0.15	91.79
1	12	21.40	0.13	80.50
1	13	20.70	0.16	96.16
1	14	20.10	0.14	84.43
1	15	19.50	0.14	86.38
1	16	18.90	0.15	88.41
1	17	18.40	0.13	75.30
1	18	17.90	0.13	76.85
1	19	17.40	0.13	78.45
1	20	16.90	0.13	80.13
1	21	16.40	0.14	81.88
1	22	15.90	0.14	83.71
1	23	15.40	0.14	85.62
1	24	15.00	0.12	69.93
1	25	14.60	0.12	71.26
3	28	13.40	0.12	74.10
3	31	12.30	0.12	72.01
3	34	11.30	0.12	69.27

Continuación del apéndice 20.

Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f(cm/min)	f(mm/hora)
3	37	10.30	0.12	73.33
3	40	9.50	0.10	61.93
3	43	8.60	0.12	73.55
3	46	7.90	0.10	60.36
3	49	7.20	0.11	63.42
5	54	6.20	0.10	57.94
5	59	5.20	0.10	62.80
5	64	4.40	0.09	54.32
5	69	3.70	0.08	50.99
5	74	3.00	0.09	54.71
5	79	2.50	0.07	41.68

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 21. Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 10



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. Prueba de infiltración 10

Unidad de muestreo: 11		Coordenadas:	N 14° 32' 17.844"	
			W 90° 21' 22.4856"	
Textura del suelo: franco arenosa arcillosa		Diámetro: 25 cm		
Uso: bosque		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hr)
0	0	30.00	0.00	0.00
1	1	28.70	0.23	136.95
1	2	27.00	0.31	186.99
1	3	26.70	0.06	33.99
1	4	26.40	0.06	34.30
1	5	25.50	0.17	104.82
1	6	24.70	0.16	95.70
1	7	24.30	0.08	48.78
1	8	24.00	0.06	37.01
1	9	23.70	0.06	37.38
1	10	23.30	0.08	50.42
1	11	23.10	0.04	25.47
1	12	22.80	0.06	38.53
1	13	22.50	0.06	38.93
1	14	22.20	0.07	39.34
1	15	22.10	0.02	13.20
1	16	22.00	0.02	13.25
1	17	21.80	0.04	26.64
1	18	21.60	0.04	26.83
1	19	21.30	0.07	40.61
5	24	20.80	0.02	13.74
5	29	20.30	0.02	13.99
5	34	19.70	0.03	17.14
5	39	19.30	0.02	11.65
5	44	19.00	0.01	8.86
5	49	18.70	0.01	8.96
5	54	18.30	0.02	12.12
5	59	18.00	0.02	9.22
5	64	17.80	0.01	6.21
5	69	17.50	0.02	9.41

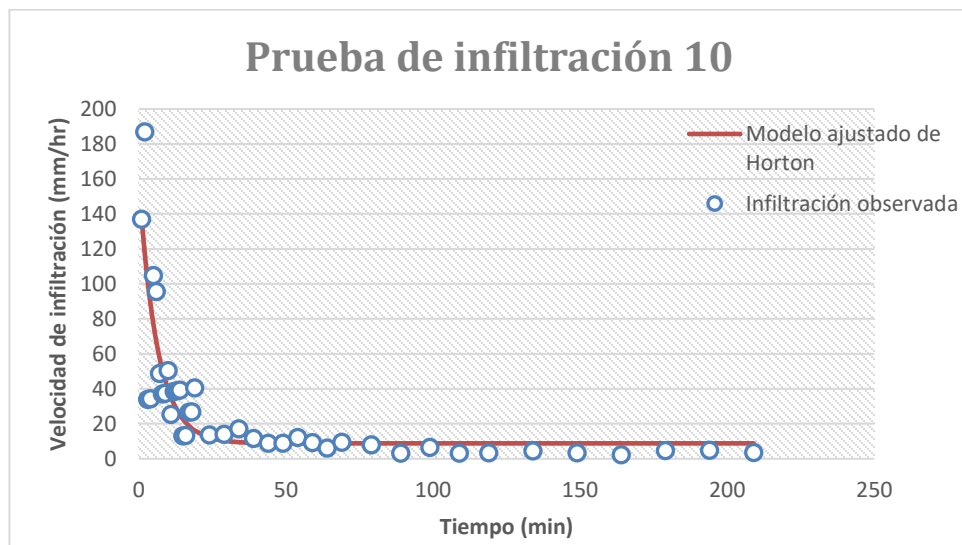
Continuación del apéndice 22.

Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hr)
10	79	17.00	0.01	7.98
10	89	16.80	0.01	3.24
10	99	16.40	0.01	6.56
10	109	16.20	0.01	3.33
10	119	16.00	0.01	3.36
15	134	15.60	0.01	4.54
15	149	15.30	0.01	3.46
15	164	15.10	0.00	2.33
15	179	14.70	0.01	4.73
15	194	14.30	0.01	4.82
15	209	14.0	0.01	3.68

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Velocidad de infiltración de unidad de muestreo**

11



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24.

Prueba de infiltración 11

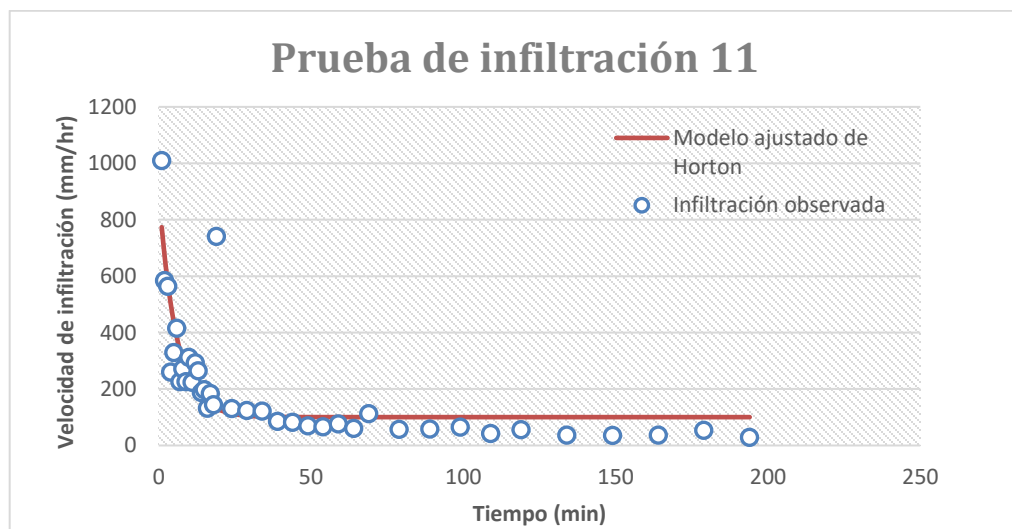
Unidad de muestreo: 12		Coordenadas:	N 14° 35` 36.2292"	
			W 90° 22` 22.8648"	
Textura del suelo: franca		Diámetro: 25 cm		
Uso: cultivos		Profundidad: 30 cm		
Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f (mm/hr)
0	0	25.50	0.00	0.00
1	1	18.00	1.68	1010.54
1	2	14.50	0.97	584.51
1	3	11.60	0.94	564.54
1	4	10.40	0.43	260.97
1	5	9.00	0.55	329.37
1	6	7.40	0.69	415.65
1	7	6.60	0.38	226.48
1	8	5.70	0.45	272.30
1	9	5.00	0.38	226.36
1	10	4.10	0.52	312.68
1	11	3.50	0.37	223.95
TM	11	27.00	TM	TM
1	12	24.50	0.49	293.12
1	13	22.40	0.44	265.26
1	14	21.00	0.31	187.87
1	15	19.60	0.33	197.79
1	16	18.70	0.22	132.89
1	17	17.50	0.31	184.84
1	18	16.60	0.24	144.87
1	19	12.50	1.24	741.59
5	24	9.50	0.22	130.77
5	29	7.10	0.21	123.99
5	34	5.10	0.20	121.72
TM	34	26.00	TM	TM
5	39	22.50	0.14	86.16
5	44	19.50	0.14	82.65
5	49	17.20	0.12	70.17
5	54	15.20	0.11	66.86
5	59	13.10	0.13	77.27
5	64	11.60	0.10	60.52

Continuación del apéndice 24.

Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f (mm/hr)
5	69	9.10	0.19	113.17
10	79	6.90	0.10	58.01
10	89	5.00	0.10	58.52
TM	89	27.00	TM	TM
10	99	21.70	0.11	65.11
10	109	18.70	0.07	42.58
10	119	15.20	0.09	56.68
15	134	12.20	0.06	37.67
15	149	9.70	0.06	36.40
15	164	7.50	0.06	37.11
15	179	4.80	0.09	54.65
15	194	3.60	0.05	28.74

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Velocidad de infiltración de unidad de muestreo**  
**12**



Fuente: elaboración propia.



Apéndice 26.

Prueba de infiltración 12

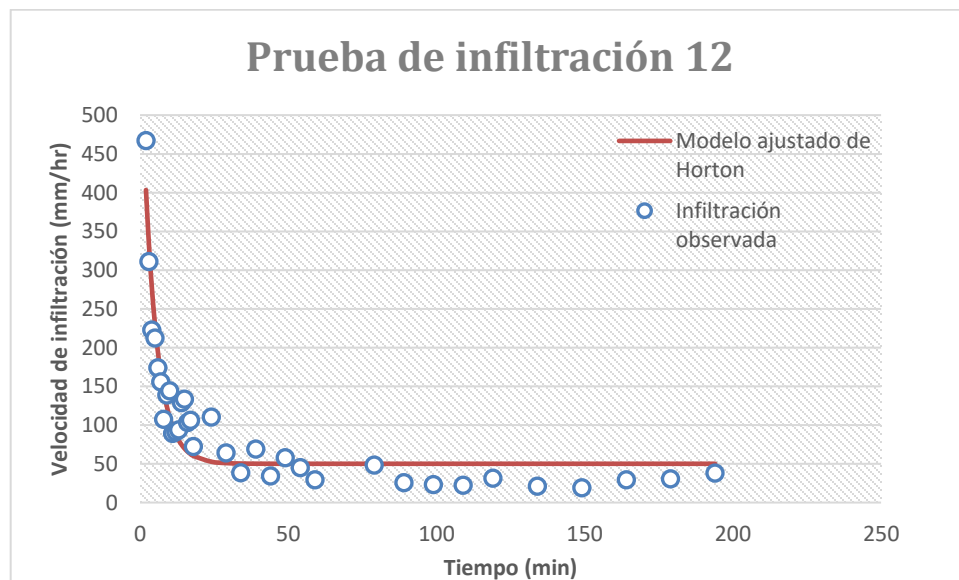
<b>Unidad de muestreo: 13</b>		<b>Coordenadas:</b>		<b>N 14° 37` 26.6232"</b>	
				<b>W 90° 23` 37.0572"</b>	
<b>Textura del suelo: arenosa</b>		<b>Diámetro: 25 cm</b>			
<b>Uso: cultivos</b>		<b>Profundidad: 30 cm</b>			
<b>Intervalo (min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Lectura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f(mm/hr)</b>	
0	0	28.00	0.00	0.00	
1	1	15.10	2.95	1772.38	
1	2	12.60	0.78	467.02	
1	3	11.10	0.52	310.95	
1	4	10.10	0.37	222.62	
1	5	9.20	0.35	212.32	
1	6	8.50	0.29	173.87	
1	7	7.90	0.26	155.73	
1	8	7.50	0.18	107.53	
1	9	7.00	0.23	138.90	
1	10	6.50	0.24	144.25	
1	11	6.20	0.15	89.29	
1	12	5.90	0.15	91.47	
1	13	5.60	0.16	93.75	
1	14	5.20	0.21	128.77	
1	15	4.80	0.22	133.35	
1	16	4.50	0.17	103.22	
1	17	4.20	0.18	106.14	
1	18	4.00	0.12	72.47	
TM	18	29.00	TM	TM	
1	19	16.40	2.76	1658.65	
5	24	13.30	0.18	110.39	
5	29	11.70	0.11	64.04	
5	34	10.80	0.06	38.58	
5	39	9.30	0.12	69.07	
5	44	8.60	0.06	34.55	
5	49	7.50	0.10	57.72	
5	54	6.70	0.07	44.96	
5	59	6.20	0.05	29.53	

Continuación del apéndice 26.

Intervalo (min)	Tiempo (min)	Lectura (cm)	f (cm/min)	f(mm/hr)
TM	59	30.00	TM	TM
5	64	20.60	0.38	225.13
5	69	16.00	0.23	140.94
10	79	13.30	0.08	48.51
10	89	12.00	0.04	25.80
10	99	10.90	0.04	23.31
10	109	9.90	0.04	22.53
10	119	8.60	0.05	31.47
15	134	7.40	0.04	21.07
15	149	6.40	0.03	19.02
15	164	5.00	0.05	29.32
15	179	3.70	0.05	30.70
15	194	2.30	0.06	37.91

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Velocidad de infiltración de unidad de muestreo 13**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. **Balance hídrico de Schosinsky / Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 2**

<b>Unidad de mapeo</b>	2			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	9.05	184.62
<b>Cobertura del suelo</b>	Bosques		<b>PMP</b>	4.06	82.824
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	4.99	101.796
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	19.538				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	2000				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.02				
<b>Cfo</b>	0.2				
<b>fc [mm/d]</b>	1060.99				
<b>Kfc</b>	0.97				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.20				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	11.24	40.72	40.79	28.33	47.86	58.11	54.62	14.01	4.60	313.44
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	44.96	162.88	163.15	113.31	191.44	232.45	218.48	56.03	0.00	1192.63
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	122.65	102.15	92.36	85.41	82.82	108.48	153.27	142.18	184.62	184.62	184.62	162.48	
ETPR (mm)	41.02	20.72	13.23	3.72	0.00	29.84	89.32	72.17	109.26	107.66	99.21	79.17	
C1	0.39	0.21	0.17	0.47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	
C2	0.00	0.01	0.04	0.43	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	0.58	0.00	
HD (mm)	39.83	21.79	17.00	47.55	162.88	188.81	183.75	250.80	334.25	320.28	157.82	79.66	
ETR (mm)	20.51	12.26	14.41	47.55	137.22	118.36	124.40	123.77	109.26	107.66	78.17	39.83	933.38
Hsf (mm)	102.15	92.36	85.41	82.82	108.48	153.27	142.18	184.62	184.62	184.62	162.48	122.65	1605.67
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.23	123.19	110.82	0.00	0.00	<b>259.25</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 3

<b>Unidad de mapeo</b>	3			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	9.05	46.155
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos anuales		<b>PMP</b>	4.06	20.706
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	4.99	25.449
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	8.34				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.02				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	326.65				
<b>Kfc</b>	0.77				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	0.93				

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.30	6.96	46.11	167.04	167.32	116.20	196.33	238.40	224.06	57.46	0.00	1222.19
Escorrentía (mm)	0.00	0.17	0.51	3.35	12.12	12.14	8.43	14.25	17.30	16.26	4.17	0.00	88.71
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	20.71	20.71	20.71	20.71	20.71	46.16	46.16	46.16	46.16	46.16	46.16	46.16	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	
C1	0.00	0.09	0.27	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.09	0.27	1.00	1.00	1.00	0.49	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	0.00	2.30	6.96	46.11	167.04	192.77	141.65	221.78	263.84	249.51	82.91	25.45	
ETR (mm)	0.00	2.30	6.96	46.11	137.22	118.36	96.45	123.77	109.26	107.66	49.60	25.45	823.14
Hsf (mm)	20.71	20.71	20.71	20.71	46.16	46.16	46.16	46.16	46.16	46.16	46.16	20.71	426.62
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	4.37	48.96	19.75	72.56	129.14	116.41	7.85	0.00	<b>399.04</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 4**

<b>Unidad de mapeo</b>	4			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillosa		<b>CC</b>	26.46	158.76
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos anuales		<b>PMP</b>	15.01	90.06
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	11.45	68.7
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	5.76				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.02				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	1737.29				
<b>Kfc</b>	1.00				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	90.06	90.06	90.06	90.06	90.06	132.01	158.76	158.49	158.76	158.76	158.76	148.31	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.27	129.06	123.29	109.26	107.66	99.21	85.79	
C1	0.00	0.04	0.11	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	
C2	0.00	0.04	0.11	0.72	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	0.45	0.84	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	193.34	279.02	324.40	309.03	130.33	58.25	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	124.91	123.77	109.26	107.66	72.07	58.25	910.89
Hsf (mm)	90.06	90.06	90.06	90.06	132.01	158.76	158.49	158.76	158.76	158.76	148.31	90.06	1524.15
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.35	0.00	86.54	146.44	132.67	0.00	0.00	400.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. **Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 5**

<b>Unidad de mapeo</b>	5			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillo arenosa		<b>CC</b>	17.71	297.53
<b>Cobertura del suelo</b>	Bosque		<b>PMP</b>	9.51	159.77
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	8.2	137.76
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	4.785				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	2000				
<b>DA [gr/cm]</b>	0.84				
<b>Cfo</b>	0.20				
<b>fc [mm/d]</b>	211.8				
<b>Kfc</b>	0.67				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.20				
<b>Ci</b>	0.93				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	90.06	90.06	90.06	90.06	90.06	132.01	158.76	158.49	158.76	158.76	158.76	148.31	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.27	129.06	123.29	109.26	107.66	99.21	85.79	
C1	0.00	0.04	0.11	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	
C2	0.00	0.04	0.11	0.72	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	0.45	0.84	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	193.34	279.02	324.40	309.03	130.33	58.25	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	124.91	123.77	109.26	107.66	72.07	58.25	910.89
Hsf (mm)	90.06	90.06	90.06	90.06	132.01	158.76	158.49	158.76	158.76	158.76	148.31	90.06	1524.15
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.35	0.00	86.54	146.44	132.67	0.00	0.00	400.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 6**

<b>Unidad de mapeo</b>	6			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillosa		<b>CC</b>	26.46	635.04
<b>Cobertura del suelo</b>	Bosque		<b>PMP</b>	15.01	360.24
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	11.45	274.8
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	4.562				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	2000				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.20				
<b>Cfo</b>	0.20				
<b>fc [mm/d]</b>	1281.6				
<b>Kfc</b>	0.99				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.20				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	11.24	40.72	40.79	28.33	47.86	58.11	54.62	14.01	4.60	313.44
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	44.96	162.88	163.15	113.31	191.44	232.45	218.48	56.03	0.00	1192.63
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	511.67	464.92	433.09	408.90	410.89	473.46	528.41	529.63	597.30	635.04	635.04	599.65	
ETPR (mm)	57.77	41.58	37.44	25.92	25.29	48.76	78.98	76.30	94.25	107.66	99.21	88.14	
C1	0.55	0.39	0.29	0.34	0.78	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.87	
C2	0.34	0.24	0.16	0.25	0.68	0.83	0.74	1.00	1.00	1.00	0.84	0.87	
HD (mm)	151.43	107.15	80.31	93.62	213.53	276.36	281.48	360.83	469.52	493.28	330.83	239.41	
ETR (mm)	46.75	34.30	31.66	42.97	100.31	108.19	112.08	123.77	109.26	107.66	91.41	87.98	996.35
Hsf (mm)	464.92	433.09	408.90	410.89	473.46	528.41	529.63	597.30	635.04	635.04	599.65	511.67	6228.00
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.46	110.82	0.00	0.00	<b>196.28</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 7

<b>Unidad de mapeo</b>	7			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	14.15	105.28
<b>Cobertura del suelo</b>	Pastizal		<b>PMP</b>	7.27	54.089
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	6.88	51.187
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	3.956				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	600				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.24				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	673.06				
<b>Kfc</b>	0.91				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.18				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	54.09	54.09	54.09	54.09	54.09	96.04	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	104.11	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	97.00	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	98.87	
C1	0.00	0.05	0.15	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	
C2	0.00	0.05	0.15	0.97	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.27	0.96	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	175.82	261.77	306.89	291.52	112.82	50.02	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	123.48	123.77	109.26	107.66	62.79	50.02	891.96
Hsf (mm)	54.09	54.09	54.09	54.09	96.04	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	104.11	54.09	996.97
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.86	1.15	86.81	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>418.94</b>

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 34. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 8

<b>Unidad de mapeo</b>	8			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	14.15	105.28
<b>Cobertura del suelo</b>	Pastizal		<b>PMP</b>	7.27	54.089
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	6.88	51.187
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	3.268				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	600				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.24				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	673.06				
<b>Kfc</b>	0.91				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.18				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	54.09	54.09	54.09	54.09	54.09	96.04	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	104.11	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	97.00	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	98.87	
C1	0.00	0.05	0.15	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	
C2	0.00	0.05	0.15	0.97	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.27	0.96	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	175.82	261.77	306.89	291.52	112.82	50.02	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	123.48	123.77	109.26	107.66	62.79	50.02	891.96
Hsf (mm)	54.09	54.09	54.09	54.09	96.04	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	104.11	54.09	996.97
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.86	1.15	86.81	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>418.94</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 35. **Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 9**

<b>Unidad de mapeo</b>	9			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	9.05	48.418
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos		<b>PMP</b>	4.06	21.721
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	4.99	26.697
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	2.946				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.07				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	326.65				
<b>Kfc</b>	0.77				
<b>Kp</b>	0.10				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	0.97				

<b>Variables</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.40	7.26	48.09	174.21	174.50	121.19	204.76	248.62	233.68	59.92	0.00	1274.62
Escorrentía (mm)	0.00	0.07	0.21	1.37	4.96	4.97	3.45	5.83	7.08	6.65	1.71	0.00	36.27
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	21.72	21.72	21.72	21.72	21.72	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	
C1	0.00	0.09	0.27	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.09	0.27	1.00	1.00	1.00	0.71	1.00	1.00	1.00	0.00	0.96	
HD (mm)	0.00	2.40	7.26	48.09	174.21	201.19	147.89	231.45	275.32	260.37	86.62	26.70	
ETR (mm)	0.00	2.40	7.26	48.09	137.22	118.36	110.03	123.77	109.26	107.66	49.60	26.70	840.34
Hsf (mm)	21.72	21.72	21.72	21.72	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	21.72	447.53
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	10.29	56.14	11.16	80.99	139.36	126.02	10.32	0.00	<b>434.28</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 10

<b>Unidad de mapeo</b>	10			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillo arenosa		<b>CC</b>	18.49	109.09
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos		<b>PMP</b>	10.00	59.00
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	8.49	50.09
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	2.14				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.18				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	1102.8				
<b>Kfc</b>	0.98				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	59.00	59.00	59.00	59.00	59.00	100.95	109.09	109.09	109.09	109.09	109.09	108.73	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.12	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	100.43	
C1	0.00	0.05	0.15	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	
C2	0.00	0.05	0.15	0.99	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.25	0.97	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	174.73	260.68	305.79	290.42	111.72	49.73	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	123.36	123.77	109.26	107.66	61.99	49.73	890.74
Hsf (mm)	59.00	59.00	59.00	59.00	100.95	109.09	109.09	109.09	109.09	109.09	108.73	59.00	1050.13
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.96	1.28	86.81	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>420.16</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 37. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 11

<b>Unidad de mapeo</b>	11			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillo		<b>CC</b>	26.46	190.51
<b>Cobertura del suelo</b>	Pastizal		<b>PMP</b>	15.01	108.07
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte		<b>CC-PMP</b>	11.45	82.44
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	1.14				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	600				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.2				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	1082.3				
<b>Kfc</b>	0.98				
<b>Kp</b>	0.06				
<b>Kv</b>	0.18				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	108.07	108.07	108.07	108.07	108.07	150.02	190.51	189.55	190.51	190.51	190.51	175.54	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.22	129.06	122.33	109.26	107.66	99.21	82.80	
C1	0.00	0.03	0.09	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	
C2	0.00	0.03	0.09	0.60	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00	1.00	0.54	0.81	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	207.08	292.06	338.14	322.77	144.07	67.47	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	125.60	123.77	109.26	107.66	76.60	67.47	925.32
Hsf (mm)	108.07	108.07	108.07	108.07	150.02	190.51	189.55	190.51	190.51	190.51	175.54	108.07	1817.52
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.61	0.00	85.85	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>385.57</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 38. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 12

<b>Unidad de mapeo</b>	12			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	14.15	105.28
<b>Cobertura del suelo</b>	Pastizal		<b>PMP</b>	7.27	54.09
<b>Tipo de pendiente</b>	Algo plana		<b>CC-PMP</b>	6.88	51.19
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	1.254				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	600				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.24				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	673.06				
<b>Kfc</b>	0.91				
<b>Kp</b>	0.15				
<b>Kv</b>	0.18				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	54.09	54.09	54.09	54.09	54.09	96.04	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	104.11	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	97.00	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	98.87	
C1	0.00	0.05	0.15	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	
C2	0.00	0.05	0.15	0.97	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.27	0.96	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	175.82	261.77	306.89	291.52	112.82	50.02	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	123.48	123.77	109.26	107.66	62.79	50.02	891.96
Hsf (mm)	54.09	54.09	54.09	54.09	96.04	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	104.11	54.09	996.97
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.86	1.15	86.81	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>418.94</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 39. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 13

<b>Unidad de mapeo</b>	13			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	9.05	224.44
<b>Cobertura del suelo</b>	Bosque		<b>PMP</b>	4.06	100.69
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	4.99	123.75
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	1.112				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	2000				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.24				
<b>Cfo</b>	0.20				
<b>fc [mm/d]</b>	1061.99				
<b>Kfc</b>	0.97				
<b>Kp</b>	0.10				
<b>Kv</b>	0.20				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	11.24	40.72	40.79	28.33	47.86	58.11	54.62	14.01	4.60	313.44
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	44.96	162.88	163.15	113.31	191.44	232.45	218.48	56.03	0.00	1192.63
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	118.87	109.99	105.70	102.19	100.69	126.35	171.14	162.40	224.44	224.44	224.44	198.57	
ETPR (mm)	15.40	8.21	5.72	1.77	0.00	24.54	73.47	61.72	109.26	107.66	99.21	80.02	
C1	0.15	0.10	0.10	0.38	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79
C2	0.02	0.03	0.05	0.36	1.00	1.00	0.89	1.00	1.00	1.00	0.65	0.78	
HD (mm)	18.18	11.77	12.47	46.46	162.88	188.81	183.75	253.15	356.21	342.23	179.78	97.88	
ETR (mm)	8.88	6.76	10.98	46.46	137.22	118.36	122.04	123.77	109.26	107.66	81.90	79.70	952.98
Hsf (mm)	109.99	105.70	102.19	100.69	126.35	171.14	162.40	224.44	224.44	224.44	198.57	118.87	1869.21
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.63	123.19	110.82	0.00	0.00	<b>239.65</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 40. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 14

<b>Unidad de mapeo</b>	14			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillosa		<b>CC</b>	26.46	158.76
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos anuales		<b>PMP</b>	15.01	90.06
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	11.45	68.70
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	1.038				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.2				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	1737.3				
<b>Kfc</b>	1.00				
<b>Kp</b>	0.10				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	90.06	90.06	90.06	90.06	90.06	132.01	158.76	158.49	158.76	158.76	158.76	148.31	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.27	129.06	123.29	109.26	107.66	99.21	85.79	
C1	0.00	0.04	0.11	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	
C2	0.00	0.04	0.11	0.72	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	0.45	0.84	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	193.34	279.02	324.40	309.03	130.33	58.25	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	124.91	123.77	109.26	107.66	72.07	58.25	910.89
Hsf (mm)	90.06	90.06	90.06	90.06	132.01	158.76	158.49	158.76	158.76	158.76	148.31	90.06	1524.15
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.35	0.00	86.54	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>400.00</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 41. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 15

<b>Unidad de mapeo</b>	15		<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillosa arenosa	<b>CC</b>	17.58	107.59
<b>Cobertura del suelo</b>	Pastizal	<b>PMP</b>	9.43	57.71
<b>Tipo de pendiente</b>	Fuerte	<b>CC-PMP</b>	8.15	49.88
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.922			
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	600			
<b>DA [gr/cm]</b>	1.02			
<b>Cfo</b>	0.12			
<b>fc [mm/d]</b>	1372.2			
<b>Kfc</b>	0.99			
<b>Kp</b>	0.06			
<b>Kv</b>	0.10			
<b>Ci</b>	1.00			

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	57.71	57.71	57.71	57.71	57.71	99.66	107.59	107.59	107.59	107.59	107.59	107.38	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.54	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	100.75	
C1	0.00	0.05	0.15	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.05	0.15	0.99	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.25	0.98	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	174.52	260.46	305.58	290.21	111.51	49.67	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	123.34	123.77	109.26	107.66	61.84	49.67	890.50
Hsf (mm)	57.71	57.71	57.71	57.71	99.66	107.59	107.59	107.59	107.59	107.59	107.38	57.71	1033.55
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.17	1.30	86.81	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>420.39</b>

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 42. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 16

<b>Unidad de mapeo</b>	16			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arcillosa		<b>CC</b>	26.46	161.94
<b>Cobertura del suelo</b>	Pastizal		<b>PMP</b>	15.01	91.86
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	11.45	70.07
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.931				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	600				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.02				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	1082.3				
<b>Kfc</b>	0.98				
<b>Kp</b>	0.10				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	91.86	91.86	91.86	91.86	91.86	133.81	161.94	161.59	161.94	161.94	161.94	150.96	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.85	129.06	123.15	109.26	107.66	99.21	85.32	
C1	0.00	0.04	0.11	0.71	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.84	
C2	0.00	0.04	0.11	0.71	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	0.46	0.83	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	194.71	280.31	325.77	310.40	131.70	59.10	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	124.99	123.77	109.26	107.66	72.61	59.10	912.35
Hsf (mm)	91.86	91.86	91.86	91.86	133.81	161.94	161.59	161.94	161.94	161.94	150.96	91.86	1553.40
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.98	0.00	86.46	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>398.55</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 43. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 17

<b>Unidad de mapeo</b>	17			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	9.05	48.42
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos anuales		<b>PMP</b>	4.06	21.72
<b>Tipo de pendiente</b>	Algo plana		<b>CC-PMP</b>	4.99	26.70
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.581				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.07				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	326.65				
<b>Kfc</b>	0.77				
<b>Kp</b>	0.15				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentia (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	21.72	21.72	21.72	21.72	21.72	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	
C1	0.00	0.09	0.28	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.09	0.28	1.00	1.00	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	0.00	0.96	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	206.16	151.33	237.28	282.40	267.02	88.33	26.70	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	118.36	123.77	109.26	107.66	49.60	26.70	850.32
Hsf (mm)	21.72	21.72	21.72	21.72	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	48.42	21.72	447.53
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	15.25	61.10	6.27	86.81	146.44	132.67	12.03	0.00	<b>460.57</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 44. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 18

<b>Unidad de mapeo</b>	18			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franco arenosa		<b>CC</b>	9.05	184.62
<b>Cobertura del suelo</b>	Bosque		<b>PMP</b>	4.06	82.82
<b>Tipo de pendiente</b>	Algo plana		<b>CC-PMP</b>	4.99	101.80
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.15				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	2000				
<b>DA [gr/cm]</b>	1.02				
<b>Cfo</b>	0.2				
<b>fc [mm/d]</b>	1060.99				
<b>Kfc</b>	0.97				
<b>Kp</b>	0.15				
<b>Kv</b>	0.20				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	11.24	40.72	40.79	28.33	47.86	58.11	54.62	14.01	4.60	313.44
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	44.96	162.88	163.15	113.31	191.44	232.45	218.48	56.03	0.00	1192.63
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	83.70	83.25	82.86	82.82	82.82	108.48	153.27	142.18	184.62	184.62	184.62	162.48	
ETPR (mm)	0.91	0.46	0.05	0.00	0.00	29.84	89.32	72.17	109.26	107.66	99.21	79.17	
C1	0.01	0.03	0.07	0.44	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	
C2	0.00	0.02	0.07	0.44	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	0.58	0.77	
HD (mm)	0.88	2.89	7.50	44.96	162.88	188.81	183.75	250.80	334.25	320.28	157.82	79.66	
ETR (mm)	0.45	2.86	7.50	44.96	137.22	118.36	124.40	123.77	109.26	107.66	78.17	78.78	933.38
Hsf (mm)	83.25	82.86	82.82	82.82	108.48	153.27	142.18	184.62	184.62	184.62	162.48	83.70	1535.74
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.23	123.19	110.82	0.00	0.00	<b>259.25</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 45. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 19

<b>Unidad de mapeo</b>	19			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franca		<b>CC</b>	21.59	418.85
<b>Cobertura del suelo</b>	Bosque		<b>PMP</b>	11.94	231.64
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	9.65	187.21
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.068				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	2000				
<b>DA [gr/cm]</b>	0.97				
<b>Cfo</b>	0.2				
<b>fc [mm/d]</b>	1581.3				
<b>Kfc</b>	1.00				
<b>Kp</b>	0.15				
<b>Kv</b>	0.20				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	11.24	40.72	40.79	28.33	47.86	58.11	54.62	14.01	4.60	313.44
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	44.96	162.88	163.15	113.31	191.44	232.45	218.48	56.03	0.00	1192.63
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	303.31	274.41	257.77	247.33	249.65	284.78	331.00	330.08	397.75	418.85	418.85	387.11	
ETPR (mm)	40.14	24.94	19.72	12.27	13.21	33.60	68.50	65.08	96.94	107.66	99.21	84.02	
C1	0.38	0.24	0.18	0.32	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.83	
C2	0.17	0.11	0.07	0.26	0.90	0.98	0.77	1.00	1.00	1.00	0.77	0.83	
HD (mm)	71.68	45.24	33.60	60.65	180.90	216.29	212.67	289.88	398.56	405.69	243.24	155.47	
ETR (mm)	28.90	19.11	17.91	42.63	127.75	116.93	114.23	123.77	109.26	107.66	87.77	83.79	979.71
Hsf (mm)	274.41	257.77	247.33	249.65	284.78	331.00	330.08	397.75	418.85	418.85	387.11	303.31	3900.88
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	102.09	110.82	0.00	0.00	<b>212.92</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 46. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 20

<b>Unidad de mapeo</b>	20			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Arenosa		<b>CC</b>	27.12	131.53
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos anuales		<b>PMP</b>	15.42	74.79
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	11.70	56.75
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.309				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	0.97				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	1201.7				
<b>Kfc</b>	0.99				
<b>Kp</b>	0.10				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	74.79	74.79	74.79	74.79	74.79	116.74	131.53	131.53	131.53	131.53	131.53	126.80	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	87.50	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	92.74	
C1	0.00	0.04	0.13	0.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	
C2	0.00	0.04	0.13	0.87	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00	1.00	0.34	0.90	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	181.38	267.33	312.44	297.07	118.37	52.02	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	124.03	123.77	109.26	107.66	66.36	52.02	898.06
Hsf (mm)	74.79	74.79	74.79	74.79	116.74	131.53	131.53	131.53	131.53	131.53	126.80	74.79	1275.13
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.31	0.61	86.81	146.44	132.67	0.00	0.00	<b>412.83</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 47. Balance hídrico de suelos de unidad de mapeo 21

<b>Unidad de mapeo</b>	21			<b>[%]</b>	<b>[mm]</b>
<b>Textura del suelo</b>	Franca		<b>CC</b>	21.59	104.71
<b>Cobertura del suelo</b>	Cultivos anuales		<b>PMP</b>	11.94	57.91
<b>Tipo de pendiente</b>	Promedio		<b>CC-PMP</b>	9.65	46.80
<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	0.21				
<b>Prof. Efectiva [mm]</b>	500				
<b>DA [gr/cm]</b>	0.97				
<b>Cfo</b>	0.12				
<b>fc [mm/d]</b>	2409.4				
<b>Kfc</b>	1.00				
<b>Kp</b>	0.10				
<b>Kv</b>	0.10				
<b>Ci</b>	1.00				

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P (mm)	3.17	7.47	12.47	56.20	203.60	203.93	141.63	239.30	290.57	273.10	70.03	4.60	1506.07
Ret (mm)	3.17	5.00	5.00	6.74	24.43	24.47	17.00	28.72	34.87	32.77	8.40	4.60	195.17
Pi (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	179.46	124.64	210.58	255.70	240.33	61.63	0.00	1310.90
Escorrentía (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	104.83	109.15	141.25	146.40	137.22	118.36	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	1427.33
Hsi (mm)	57.91	57.91	57.91	57.91	57.91	99.86	104.71	104.71	104.71	104.71	104.71	104.71	
ETPR (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	106.08	129.06	123.77	109.26	107.66	99.21	101.17	
C1	0.00	0.05	0.16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.05	0.16	1.00	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.20	0.98	
HD (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	179.17	221.41	171.44	257.39	302.50	287.13	108.43	46.80	
ETR (mm)	0.00	2.47	7.47	49.46	137.22	118.36	122.96	123.77	109.26	107.66	59.38	46.80	884.80
Hsf (mm)	57.91	57.91	57.91	57.91	99.86	104.71	104.71	104.71	104.71	104.71	104.71	57.91	1017.67
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.25	1.68	86.81	146.44	132.67	2.25	0.00	<b>426.10</b>

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

Anexo 1. **Valores medios mensuales de radiación solar extraterrestre  
(mm/día)**

Latitud norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>10</b>	12,8	13,9	15,1	15,7	15,7	15,5	15,5	15,6	15,2	14,4	13,3	12,5
<b>15</b>	12,4	13,6	14,9	15,7	15,0	15,7	15,7	15,7	15,1	14,1	12,8	12,0
<b>20</b>	12,0	13,3	14,7	15,6	16,0	15,9	15,9	15,7	15,0	13,6	12,4	11,6

Fuente: Herrera (1995). *Manual de hidrología*.

Anexo 2. **Duración máxima diaria de horas de brillo solar para  
diferentes meses y altitudes**

Latitud norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>10</b>	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
<b>15</b>	11,3	11,6	12,0	12,5	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
<b>20</b>	11,0	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9

Fuente: Orozco, Padilla y Salguero (2003). *Manual técnico para determinación de las áreas potenciales de recarga hídrica*.



Anexo 3. **Índice de las presiones para algunas de las actividades antropogénicas**

<b>Actividades</b>	<b>ÍNDICE DE LAS PRESIONES</b>
<b>INFRAESTRUCTURAS DE DESARROLLO URBANO</b>	
Zonas urbanizadas con red de alcantarillado	35
Zonas urbanizadas sin red de alcantarillado	70
Cloacas en granjas y sistema de riego con aguas residuales	55
Superficie para aguas residuales urbanas	60
Riego con aguas residuales	60
Descarga de aguas residuales en cursos de agua superficial	45
Inyección de aguas residuales en pozos	85
<b>RESIDUOS MUNICIPALES</b>	
Basureros, vertederos	40
Estación de carga de residuos y depósito de chatarras	40
Vertedero sanitario	50
Depósito de escombros	35
Residuos de planta de tratamiento	35
<b>COMBUSTIBLES</b>	
Tanques de almacenaje sobre tierra	50
Tanques de almacenaje bajo tierra	55
Estaciones de carga de combustible	60
Gasolineras	60
<b>TRANSPORTE Y TRÁNSITO</b>	
Carretera	40
Túnel de carretera	40
Línea de tren	30
Túnel de ferrocarril	30
Estación de trenes	35
Helipuertos	35
Conducciones de líquidos peligrosos	60
<b>INSTALACIONES RECREATIVAS</b>	
Centro turístico	30
Campamento	30
Estadios y pistas de deportes al aire libre	25
Campo de golf	35
Cementerio	25
Local de lavado	35
Instalaciones militares y abandonadas	35
<b>ACTIVIDADES INDUSTRIALES</b>	
Minería activa o abandonada	70
Depósitos al aire libre de materias primas peligrosas	85
Molienda de minerales	70
Residuos minerales	70
Balsa de residuos minerales	65
Excavación o terraplenes	10
Mina de arena o grava	30
Canteras	25

Continuación del anexo 3.

<b>GANADERÍA Y AGRICULTURA</b>	
Granja de animales	30
Pesebres	30
Factoría agrícola	30
Estercolero	45
Tanques de almacenaje de estiércol líquido	45
Área de pastoreo intensivo	25
Campo de cultivo	25
Agricultura de secano	25
Agricultura de regadío	30
Depósito de fertilizantes y pesticidas	40
Áreas de agricultura intensiva	30
Jardín	15
Vivero	20
Riego con aguas residuales	60
<b>OTRAS ACTIVIDADES INDUSTRIALES</b>	
Taller mecánico	50
Lavado y engrase de vehículos	50
Industria de pinturas, lacas y barnizados	60
Industria de piedras ornamentales	40
Carpintería metálica	50
Venta de fitosanitarios y abonos	40
Carpintería de madera	30
Restaurante	25
Secaderos de esparto	30
Planta de tratamiento de plantas aromáticas	30
Comercio de metales	30
Comercio de productos de construcción	25
Fábrica de productos cerámicos	30
Elaboración y crianza de vinos	25
Industria agroalimentaria	40
Fábrica de jabones y detergentes	40
Fabricación de jabones y detergentes	40
Fabricación de pavimentos y derivados del cemento	40
Prefabricados de escayola	30

Fuente: Jiménez-Madrid (2011). *Racionalidad pacífica. Una introducción a los estudios para la paz.*

