



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos (ERIS)

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE VULNERABILIDAD A  
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO NORESTE DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA, COMO HERRAMIENTA DE FORTALECIMIENTO DE LA  
GESTIÓN HÍDRICA METROPOLITANA**

**Ing. Agr. Edio Giovanni González Celada, M.Sc.**

Asesorado por el M.Sc. Ing. Elfego Odvin Orozco

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE VULNERABILIDAD A  
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO NORESTE DE LA CIUDAD DE  
GUATEMALA, COMO HERRAMIENTA DE FORTALECIMIENTO DE LA  
GESTIÓN HÍDRICA METROPOLITANA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**ING. AGR. EDIO GIOVANNI GONZÁLEZ CELADA, M.Sc.**

ASESORADO POR EL M.Sc. ING. ELFEGO ODVIN OROZCO FUENTES

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN RECURSOS HIDRÁULICOS  
OPCIÓN HIDROLOGÍA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova
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. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL**

EXAMINADOR MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes  
EXAMINADOR MSc. Ing. Juan José Sandoval  
EXAMINADOR MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

## **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:

### **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE VULNERABILIDAD A CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO NORESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, COMO HERRAMIENTA DE FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN HÍDRICA METROPOLITANA**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 07 de agosto, 2018.

**Ing. Agr. Edio Giovanni González Celada, M.Sc.**

vagio7045@gmail.com

Carné No. 200718205

UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería  
Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
COORDINACIÓN  
RECURSOS HIDRÁULICOS

Edificio ERIS,  
Area de prefabricados, CII  
Ciudad Universitaria zona 12  
Ciudad de Guatemala 01012  
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,  
Ext. 86213 y 86212  
(502) 2418 9138

[www.ingenieria-usac.edu.gt](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)

Guatemala, 07 de octubre de 2019

Señores  
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de asesor del estudio y, a la vez, Coordinador de la Maestría de Recursos Hidráulicos, del trabajo de Estudio Especial titulado:

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE  
VULNERABILIDAD A CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO  
NORESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, COMO  
HERRAMIENTA DE FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN  
HÍDRICA METROPOLITANA**

presentado por la estudiante,

**Ingeniero Agrónomo Edio Giovanni González Celada**

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Elfego Orozco  
Coordinador Maestría de Recursos Hidráulicos



El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Juan José Sandoval, MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque y MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes; así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos, MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes, la revisión de lingüística realizada por la Licda. en Letras Ruth Noemí Cardona Mazariegos, colegiada No. 12,498, al trabajo del estudiante: Ingeniero Agrónomo, Edio Giovanni González Celada titulado **"DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE VULNERABILIDAD A CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO NORESTE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, COMO HERRAMIENTA DE FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN HÍDRICA METROPOLITANA"**, en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo en Guatemala, 09 de octubre de 2019.

**IMPRIMASE**

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis  
DIRECTOR



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Guatemala**

“Tierra desnuda, tierra despierta, tierra maicera bañada por ríos de agua hedionda de tanto estar despierta” (Miguel Ángel Asturias)

**Mi familia**

Por su ejemplo de lucha cotidiana, los límites terminan hasta que así lo decidimos.

**Mis padres y hermanos**

Los amo, por su presencia.





## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindar educación superior al pueblo de Guatemala, y participar en la formación de mi criterio profesional.
<b>Escuela Nacional Central de Agricultura</b>	Alma máter, por la excelencia forjada en sus aulas y disciplina de vida.
<b>Municipalidad de Palencia</b>	Por su colaboración en el acceso a información.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	I
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN .....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
JUSTIFICACIÓN .....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
HIPÓTESIS .....	XIX
ANTECEDENTES .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. REVISIÓN DE LITERATURA .....	1
1.1. Cuenca hidrográfica .....	1
1.2. Cuenca hidrológica o de agua subterránea .....	2
1.3. Manejo integrado del recurso hídrico.....	2
1.4. Ciclo hidrológico .....	3
1.5. Agua subterránea .....	4
1.6. Acuífero.....	5
1.7. Parámetros hidrogeológicos .....	7
1.7.1. Porosidad .....	7
1.7.2. Permeabilidad intrínseca.....	7

1.7.3. Conductividad hidráulica .....	8
1.7.4. Transmisividad.....	8
1.7.5. Coeficiente de almacenamiento .....	8
1.7.6. Tabla de agua.....	9
1.8. Heterogeneidad y anisotropía.....	9
1.9. Carga hidráulica .....	10
1.10. Gradiente hidráulico .....	10
1.11. Modelación hidrológica de la recarga hídrica.....	11
1.12. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas .....	12
1.12.1 Método DRASTIC .....	13
1.12.2 Limitaciones y ventajas del método DRASTIC .....	14
1.13. Sensibilidad de capas espaciales .....	15
2. MÉTODOS Y MATERIALES .....	17
2.1. Área de estudio .....	17
2.2. Métodos para determinar los factores del índice DRASTIC (OE 1)....	18
2.2.1. Profundidad del agua (D).....	19
2.2.2. Recarga neta (R).....	20
2.2.3. Medio del acuífero (A).....	26
2.2.4. Medio del suelo (S) .....	27
2.2.5. Topografía (T) .....	28
2.2.6. Impacto de la zona vadosa (I) .....	28
2.2.7. Conductividad hidráulica (C) .....	29
2.3. Cálculo de la vulnerabilidad espacial a contaminación del acuífero ..	30

2.3.1. Ponderación de factores .....	30
2.3.2. Operación de pesos y calificaciones .....	31
2.3.3. Clasificación de la vulnerabilidad .....	31
2.4. Método para priorizar zonas de vulnerabilidad por influencia antrópica .....	32
2.5. Método para el análisis de sensibilidad de los parámetros DRASTIC	35
3. PARÁMETROS DEL MÉTODO DRASTIC .....	37
3.1. Profundidad del agua .....	37
3.2. Recarga neta .....	38
3.2.1. Calibración, análisis de incertidumbre y sensibilidad .....	38
3.2.2. Recarga simulada .....	40
3.3. Medio del acuífero .....	42
3.4. Medio del suelo .....	43
3.5. Topografía .....	44
3.6. Impacto de la zona vadosa .....	45
3.7. Conductividad hidráulica .....	46
4. VULNERABILIDAD ESPACIAL A CONTAMINACIÓN .....	47
5. PRIORIZACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD POR INFLUENCIA ANTRÓPICA .....	53
6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DEL MÉTODO DRASTIC .....	57

CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
ANEXOS .....	75

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Parámetros hidrogeológicos considerados por el método DRASTIC..... 13
2. Acuífero noreste de ciudad de Guatemala. .... 18
3. Suelos, uso/cobertura de la tierra y topografía usados de entrada en la herramienta SWAT, para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. UCS son unidades cartográficas de suelo (Anexo 1) .....22
4. Valores de clasificación para el parámetro profundidad del agua (D), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala. ....37
5. Calibración en la salida de la cuenca río Los Ocotes (Puente Los Ocotes), acuífero noreste de la ciudad de Guatemala.....39
6. Valores de clasificación para el parámetro recarga neta (R), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala.....41
7. Valores de clasificación del parámetro medio del acuífero (A), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala .....42
8. Valores de clasificación del parámetro medio del suelo (S), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala .....43
9. Valores de clasificación del parámetro topografía (T), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala.....44
10. Valores de clasificación del parámetro impacto de la zona vadosa (I), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala .....45
11. Valores de clasificación del parámetro conductividad hidráulica (C), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala .....46
12. Distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala.....49

13.	Distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, aplicando clasificación con base al rango de valores numéricos del índice DRASTIC para este acuífero.....	51
14.	Priorización de la vulnerabilidad potencial a contaminación según clasificación del uso de la tierra modificada de Ribeiro (2005) .....	54
15.	Priorización de la vulnerabilidad potencial a contaminación según de clasificación de uso de la tierra de Secunda et al. (1998).....	55
16.	Priorización de la vulnerabilidad a contaminación según propuesta local de uso de la tierra .....	56
17.	Tendencia de la ponderación efectiva con respecto a la teórica de los siete parámetros hidrogeológicos del índice DRASTIC en el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala .....	59

## TABLAS

I.	Valores de clasificación para el factor D .....	20
II.	Rangos de calibración de parámetros con el algoritmo SUFI-2, para la variable caudal, en la salida de la cuenca Los Ocotes .....	25
III.	Valores de clasificación de recarga neta.....	26
IV.	Valores de clasificación de medio del acuífero.....	27
V.	Clasificación del medio del suelo .....	27
VI.	Valoración de parámetro topografía .....	28
VII.	Clasificación del impacto de la zona vadosa .....	29
VIII.	Clasificación de conductividad hidráulica .....	30
IX.	Pesos de los parámetros del índice DRASTIC .....	31
X.	Código de color nacional para los rangos del índice DRASTIC.....	32

XI.	Clasificaciones asignadas al uso/cobertura de la tierra respecto a su influencia en el incremento de la contaminación del acuífero.....	34
XII.	Valores de reclasificación del potencial a vulnerabilidad .....	34
XIII.	Distribución porcentual del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, aplicando el código de color nacional de los Estados Unidos al método DRASTIC. ....	48
XIV.	Distribución porcentual del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, con base a propuesta de clasificación local. ....	50
XV.	Estadística del análisis de sensibilidad de un solo parámetro, y los pesos teóricos del índice DRASTIC, para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala .....	58
XVI.	Unidades cartográficas de suelo utilizadas para modelar recarga hídrica con la herramienta SWAT .....	75





## GLOSARIO

DRASTIC	Acrónimo formado por la letra inicial de los siete parámetros hidrogeológicos profundidad del agua (D), recarga neta (R), medio del acuífero (A), medio del suelo (S), topografía (T), impacto de la zona vadosa (I), y conductividad hidráulica (C)
SWAT	Herramienta de modelación hidrológica <i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWAT-CUP	Herramienta de calibración hidrológica para SWAT, <i>Calibration Uncertainty Prediction</i>
SUFI-2	Algoritmo de calibración <i>Sequential Uncertainty Fitting Version 2</i>



## RESUMEN

Se determina el potencial de vulnerabilidad espacial a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, con base a sus características intrínsecas, con el fin de ser una herramienta de fortalecimiento de la gestión hídrica metropolitana. Se utilizó el método por sobreposición índice DRASTIC, el cual está compuesto por siete parámetros hidrogeológicos, profundidad del agua (D), recarga neta (R), medio del acuífero (A), medio del suelo (S), topografía (T), impacto de la zona vadosa (I), y conductividad hidráulica (C). La recarga neta se obtuvo por modelación hidrológica con la herramienta SWAT (Soil Water Assessment Tool); se calibró la variable caudal observado con el algoritmo SUFI-2 del programa SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), donde la calibración no fue satisfactoria en el único punto de calibración. Los otros seis parámetros del índice DRASTIC se estimaron con base a información existente en el acuífero noreste y su posterior procesamiento en el programa QGIS v 2.6.1. La vulnerabilidad de este acuífero es mayoritariamente baja (56 %), según el código de color de los Estados Unidos, y estableciendo una clasificación local de vulnerabilidad, la mayor superficie es de vulnerabilidad media (66 %). Con base al uso de la tierra como parámetro de influencia por actividades antrópicas en la contaminación del acuífero, predomina las zonas de baja prioridad; las cuales corresponden al uso bosque. Mientras que las zonas de alta y media prioridad están en áreas de uso agricultura anual, matorrales y pastos. De los siete parámetros del índice DRASTIC, los de mayor impacto o influencia en el potencial a vulnerabilidad son el impacto de la zona vadosa, medio del acuífero, y recarga hídrica; según el análisis de sensibilidad de un solo parámetro.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ubicación de la ciudad de Guatemala es estratégica en cuanto a contaminación hídrica se refiere, debido a que está situada en cabeceras de cuenca, principalmente de los ríos Villalobos y Las Vacas, lo que se traduce en múltiples fuentes de contaminación dada la diversidad de actividades en dicha zona metropolitana (IARNA-URL & TCN, 2013).

Según el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (2000), muchos acuíferos poco profundos libres y adyacentes a zonas pobladas de Guatemala se contaminan por fuentes superficiales, además de contaminación química y biológica; esta última por malas prácticas de disposición de desechos de origen antrópico.

Las cuencas volcánicas de Guatemala demuestran cierta asociación entre calidad fisicoquímica de sus aguas subterráneas y la infiltración de lluvia que tiende a no mezclarse con otras fuentes de agua subterránea, dado el rápido desplazamiento del agua, a través del sistema de fracturado rocoso (Herrera Ibáñez, 2012).

En la zona metropolitana este sistema de fracturas propio del Terciario brinda permeabilidad secundaria, tanto para el desplazamiento como almacenamiento del agua en el acuífero (IARNA-URL & TCN, 2013). Este fracturamiento ha incrementado considerablemente la porosidad y permeabilidad de los acuíferos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, 2000).

De la misma manera, el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala mayoritariamente está representado por dos unidades hidrogeológicas, piroclastos de pómez y rocas volcánicas fracturadas del Terciario, que en adición a la estructura de fallas geológicas brinda un medio fisurado por el alto grado de fractura de rocas (Herrera Ibáñez, Manzo Barrientos, y Hernández, 2016); brindándole alta permeabilidad y flujos a través de fisuras (Ballesteros, Reyes, y Astorga, 2007)

Por otro lado, en Guatemala no existe información de patrones de calidad de ríos y acuíferos, pese a los esfuerzos por alimentar bases de datos por diversas instituciones gubernamentales y privadas. Por otro lado, los estudios referentes a vulnerabilidad de aguas subterráneas son limitados y el país no cuenta con una Ley de aguas (Tábora *et al.*, 2011). Igualmente, no existe una autoridad nacional en materia de agua y la legislación con relación a esta es limitada (Basterrechea, 2012).

## JUSTIFICACIÓN

Como se abordó en la definición del problema, las condiciones inherentes de la geología del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala y su ubicación, lo hacen vulnerable por el sistema fracturado rocoso; ya que aquellos contaminantes que ingresen en dicho sistema fracturado se transportarán rápidamente (Aller, Bennett, Lehr, Petty, y Hackett, 1987). A su vez, la ausencia y pobre información de patrones espaciales del potencial a contaminación de acuíferos y la pobre legislación de aguas; hacen necesario determinar cuál es la distribución espacial del potencial a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, y con base a esto se constituya como herramienta de fortalecimiento de la gestión hídrica para los tomadores de decisión de planificación territorial y ambiental, y comunidad científica que trabaja en la evaluación y gestión hídrica.

Es así como la distribución espacial del potencial de contaminación a determinarse en este estudio puede ser utilizada como un criterio más para zonificación hidrogeológica, diagnóstico de las aguas subterráneas locales, ubicación y priorización de sitios de monitoreo de calidad y protección de agua subterránea; además de generar y actualizar información del acuífero bajo estudio (Aller *et al.*, 1987). De todos estos, este estudio realiza una priorización de la vulnerabilidad a contaminación con base al uso/cobertura de la tierra; utilizando este último como parámetro de influencia antrópica. Este análisis inicial exploratorio por sobreposición e índice a realizarse, posteriormente puede ser validado, y/o aplicar métodos más robustos de vulnerabilidad de aguas subterráneas a contaminación; la modelación matemática basada en procesos y los métodos estadísticos con base empírica de la relación entre la química del agua y las variables de la zona de estudio (Gurdak, 2014).





## **OBJETIVOS**

### **General:**

Determinar el potencial de vulnerabilidad espacial a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, como herramienta de fortalecimiento de la gestión hídrica.

### **Específicos:**

1. Determinar los siete factores del índice DRASTIC; a partir de información existente y/o estimación.
2. Calcular la vulnerabilidad del acuífero por sobreposición de los siete parámetros del método DRASTIC.
3. Priorizar zonas de vulnerabilidad a contaminación en el acuífero, con base al uso/cobertura de la tierra como parámetro de influencia antrópica.
4. Analizar la sensibilidad de los parámetros del índice DRASTIC en la zona de estudio.



## **HIPÓTESIS**

La clase de vulnerabilidad potencial a contaminación baja es la de mayor frecuencia, espacialmente, en el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala.



## ANTECEDENTES

El acuífero noreste de la ciudad de Guatemala tiene correspondencia espacial con la cuenca hidrográfica de los ríos Los Ocotes y Teocinte, ocupando superficie de los municipios Guatemala, Santa Catarina Pinula, San José Pinula y Palencia, y el área de la cuenca es 198.72 km<sup>2</sup> (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016). La ciudad de Guatemala ésta ubica en la depresión tectónica valle de Guatemala, dividida por dos cuencas hidrográficas, cuenca norte y sur; las cuales tienen una correspondencia aproximada con la divisoria de las aguas subterráneas freáticas (Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología, 1978).

El municipio de Guatemala se abastece de agua de fuentes superficiales y subterráneas, con un aporte aproximado del 50 % de cada una (Guzmán Sáenz, 2013). El abastecimiento de fuente subterránea proviene del sistema de pozos mecánicos, ubicados en acuíferos locales; aproximadamente en el acuífero noreste existen 100 pozos de bombeo (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016). Mientras que, las fuentes superficiales se obtienen de cuencas hidrográficas relacionadas a los ríos Coyolate, Las Vacas, Plátanos y María Linda; además de la importación de agua superficial de la cuenca Xayá-Pixcayá (G. Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy, 2013).

La gestión del recurso hídrico en la zona metropolitana conlleva a varios retos, por ejemplo en la subcuenca del río Los Ocotes, que corresponde a una parte del acuífero noreste, existe sobre explotación de las aguas subterráneas (Herrera Ibáñez, 2012), en la mayoría de superficie de la metrópoli la extracción es superior a la recarga hídrica (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y

Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy, 2012); los costos de extracción de agua subterránea son superiores en comparación a la obtención de agua superficial de la cuenca Xayá-Pixcayá (Chacón, 2011). Además, el descenso de niveles freáticos de aguas subterráneas de la zona norte y este de la ciudad de Guatemala (Coló López, 2014; IARNA-URL & TCN, 2012; Morales Samayoa, 2013). Si se agrega al análisis de la gestión del agua la vulnerabilidad potencial y el estado actual de contaminación, la sostenibilidad de este recurso natural se hace más vulnerable y el bienestar humano se degrada si no se emplea un enfoque de gestión integral de los recursos hídricos.

Si se habla de vulnerabilidad a contaminación de un acuífero, existen tres categorías generales de enfoques para estudiarla: estos son, métodos de superposición e índices, métodos estadísticos, y métodos físicamente basados en procesos (Zhang, Hamerlinck, Gloss, y Munn, 1996). De estos enfoques el más ampliamente utilizado para estudiar la vulnerabilidad de acuíferos y de aguas subterráneas a gran escala ha sido el de superposición e índices. Asimismo, dicho enfoque fue el primero en utilizarse para evaluar la vulnerabilidad de aguas subterráneas (Iqbal, Gorai, Tirkey, y Pathak, 2012).

Los métodos de superposición buscan elaborar índices con base a la agregación de factores y/o variables que en conjunto contribuyen a la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a ser contaminadas (Gurdak, 2014). Cada factor tiene un aporte relativo diferente y varía en el espacio; por ello es imperativo que su ponderación refleje el entorno físico local (Iqbal *et al.*, 2012). Existen diferentes índices de superposición, por ejemplo DRASTIC, SEEPAGE, GOD, AVI, EPIK, entre otros. De estos, el índice o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) es el más usado y fue el primero desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*EPA*, por sus siglas en inglés).

El método DRASTIC se basa en siete parámetros y/o factores hidrogeológicos para evaluar el potencial de contaminación de las aguas subterráneas (Iqbal *et al.*, 2012). Los siete factores del sistema hidrogeológico considerado en este índice incorporan los principales factores que afectan y controlan el movimiento del agua subterránea; profundidad del agua, recarga hídrica neta, medio del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica, los que dan origen al acrónimo DRASTIC. Es así, para obtener un valor numérico del índice DRASTIC se utiliza una combinación de valores de clasificación y ponderaciones, que dan lugar a un sistema de clasificación relativo que crea unidades de vulnerabilidad a graficar en un mapa (Aller *et al.*, 1987).

Es importante indicar que el índice DRASTIC al considerar propiedades del acuífero, fuente del agua y tensiones asociadas al sistema; constituye una medida de la susceptibilidad o vulnerabilidad intrínseca del sistema de aguas subterráneas, ya que no considera la ubicación y tipo de contaminación (Focazio, Reilly, Rupert, y Helsel, 2002). Los usos potenciales del método DRASTIC pueden ser, criterio de zonificación hidrogeológica para eliminación de residuos y usos de la tierra, priorización de áreas donde la protección de aguas subterráneas es crítica, priorización de áreas de monitoreo, evaluación del uso/cobertura asociado a contaminación del acuífero, evaluación económica de eliminación de áreas ubicadas en zonas de alta vulnerabilidad, identificar vacíos de información que afectan la evaluación del potencial de contaminación (Aller *et al.*, 1987).

En Guatemala, Orozco Orozco, Herrera Ibáñez, y Mujica Cervantes (2011) mapearon la vulnerabilidad del acuífero del valle de Chimaltenango, utilizando el método de sobreposición e índice GOD; donde la mayor vulnerabilidad se presentó en las zonas urbanas. Igualmente, Girón y Girón (2011) usó el índice



GOD para determinar la vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la ciudad de Chiquimula, y encontró que más del 80 % de la superficie corresponde a baja vulnerabilidad. De igual forma, López Bautista (2005) usó el método GOD, encontrando que el 95.64 % de la cuenca del río Platanitos presentó vulnerabilidad media.

Por el contrario, Ramírez Mejía (2003), determinó la vulnerabilidad a contaminación del área noreste de valle de la ciudad capital de Guatemala, empleando el índice DRASTIC; donde la mayor frecuencia de los cuatro sectores evaluados fue vulnerabilidad moderada. En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), existen algunos ejemplos de aplicación del índice DRASTIC; por ejemplo, Rivera (2005), realizó un análisis de vulnerabilidad a contaminación en pozos ubicados en la microcuenca del río Pansalic, Guatemala. Por su lado, Martínez Izaguirre (2017), evaluó en Nicaragua la vulnerabilidad del acuífero del valle del Sébaco.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo a Megdal (2018), la dependencia mundial por el agua subterránea se ha incrementado, resultado del impacto de impulsores de cambio como lo son el aumento de la población y el cambio climático; es por ello que los responsables del manejo y políticos deben prestar atención al recurso agua subterránea, tanto en calidad como en cantidad. Es así como la gobernanza de este recurso local es vital para las necesidades humanas y la productividad en muchas regiones del mundo. En materia de calidad de agua subterránea, a escala global existen hallazgos de que la recarga hídrica más reciente de los acuíferos, menos de 50 años, es la más vulnerable a contaminación por actividades industriales y agrícolas (Gleeson, Befus, Jasechko, Lujendijk, y Cardenas, 2016).

Cabe agregar que la calidad del agua subterránea es un tema de interés mundial, ya que su degradación asociada a la actividad antrópica es muy importante en muchos lugares, ya que la contaminación es un problema cada vez más frecuente en los países en desarrollo; donde la influencia antrópica principalmente se debe a la contaminación química de actividades industriales y agrícolas, mientras que la contaminación biológica por desechos humanos y animales (Giordano, 2009). Otro problema de calidad de agua es la contaminación por altos niveles de arsénico (Alaerts y Khouri, 2004; Giordano, 2009).

En Guatemala existen hallazgos de la presencia de altos niveles de arsénico, tal es el caso en el Municipio de Chimaltenango, donde en una capa de roca volcánica del terciario el nivel de arsénico en el agua subterránea esta arriba de

lo permitido por la Organización Mundial de la Salud, esto se justifica debido a que este tipo de rocas es una fuente natural de arsénico (Lotter *et al.*, 2014).

Por otro, lado existen hallazgos aislados en la región Metropolitana de Guatemala de la vulnerabilidad intrínseca de sus acuíferos. Es así como en la cuenca hidrográfica del río Los Ocotes, la vulnerabilidad es mayoritariamente baja (53 %) (Herrera Ibáñez, 2015), mientras que al sur de la ciudad, en la cuenca del río Platanitos, predomina la vulnerabilidad media (López Bautista, 2005).

El acuífero noreste de la ciudad de Guatemala juega un rol importante en el aprovisionamiento de agua para consumo humano de esta ciudad y los municipios aledaños; tanto de fuentes superficiales como de subterráneas. En este propósito estimar a través de un método de sobreposición, como primera aproximación, la distribución potencial de vulnerabilidad a contaminación es un enfoque que fortalece los elementos para mejorar la gestión hídrica metropolitana.

Este estudio se basa en la aplicación del método por sobreposición y de amplio uso a nivel global conocido por el acrónimo de la letra inicial de los siete parámetros hidrogeológicos considerados, DRASTIC, este expone que un contaminante se introduce en la superficie del suelo y que se descarga en las aguas subterráneas por la acción del movimiento de la porción de la precipitación pluvial que recarga el acuífero (Aller *et al.*, 1987). Adicionalmente, se realizó priorización del potencial a vulnerabilidad tomando como variable de influencia antrópica el uso/cobertura de la tierra, finalmente se analiza la sensibilidad de los parámetros DRASTIC localmente.

# 1. REVISIÓN DE LITERATURA

## 1.1. Cuenca hidrográfica

Según Musy y Higy (2011, p. 71), “es la unidad espacial de referencia en la ciencia de la hidrología”; porque es la unidad geográfica básica para estudiar el ciclo hidrológico. Su definición más universal es, el área de drenaje natural de un lago o río y sus afluentes, y está separada de otras cuencas hidrográficas por la división de drenaje o parte aguas. Para McCuen (1998), la cuenca en términos de un punto, es aquel que suele ser el lugar en el que se está realizando el diseño y se le denomina salida de la cuenca hidrográfica; e igualmente a los autores del primer párrafo, coinciden en que la cuenca hidrográfica se define por todos los puntos encerrados dentro del área de drenaje de la misma.

La cuenca hidrográfica es la unidad de análisis y planificación donde el flujo de energía, agua y materia se integran en la cuenca y funcionan como una única entidad (Zalewski y Wagner-Lotkowska, 2004). Griffiths (2014) señala que la cuenca hidrográfica puede ser representada por una serie de características del suelo, climáticas, de forma de la tierra, drenaje y de uso del suelo. En este espacio de delimitación natural convergen varios sistemas, dentro de ellos el antrópico. Entendiendo lo anterior, en la cuenca se debe de dar un manejo y gestión integrada, considerándolas tanto como unidad de planificación territorial, como también en espacios de construcción social.

## **1.2. Cuenca hidrológica o de agua subterránea**

Barrocu (2014, p. 222), define la cuenca de agua subterránea como “el área de tierra donde todas las aguas superficiales que infiltran en el suelo van a similares cuerpos de agua subterránea a lo largo de líneas de flujo verticales y horizontales, de las zonas de recarga a las de descarga”. El mismo autor, señala que el agua colectada en la cuenca de agua subterránea no siempre coincide con el agua superficial drenada de la cuenca hidrográfica. El caso contrario, sucede cuando el agua que alimenta al sistema río no solo proviene de drenaje superficial, también existen aportes de agua subterránea que fluye de otras cuencas hidrográficas (Zalewski y Wagner-Lotkowska, 2004).

Por tanto, la similitud de los límites de la cuenca hidrográfica y cuenca de agua subterránea es un caso raro, dada la heterogeneidad geológica y de suelo (Griffiths, 2014). Esto se debe a que el flujo del agua superficial depende de la geomorfología (relieve y fisiografía) y el flujo subterráneo de la estructura del espacio poroso del acuífero (Farrocu, 2014; Griffiths, 2014); esto provoca cambios en la dirección del flujo del agua infiltrada.

## **1.3. Manejo integrado del recurso hídrico**

El manejo integrado del recurso hídrico “es un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”. En este enfoque es imperativo el manejo de la demanda y oferta de agua; destacando para su integración de los sistemas natural (disponibilidad y calidad) y humano; este último está involucrado en el uso del recurso y la producción de desechos

que contaminan el mismo (Global Water Partnership Technical Advisory Committee, 2000, p. 24).

Como enfoque tiene por finalidad la gestión y desarrollo sostenible de los recursos hídricos de manera equilibrada, considerando los intereses de los sectores social, económico y ambiental sobre los recursos hídricos, ya que estos sectores son los encargados del uso y abuso del agua. También toma en cuenta la participación política (Global Water Partnership y International Network of Basin Organizations, 2009).

#### **1.4. Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico se lleva a cabo en la hidrosfera a través de procesos que suceden continuamente; por ello su explicación puede iniciar por cualquier proceso. La evaporación es el transporte de vapor de agua hasta la atmósfera, es en esta donde el vapor de agua se condensa. Luego sucede la precipitación; una vez en la superficie de la tierra el agua puede tomar varios caminos: intercepción por la vegetación, flujo superficial, infiltración, flujo subsuperficial y la descarga en afluentes. El agua infiltrada puede llegar a recargar aguas subterráneas y su posterior descarga en cuerpos y corrientes de agua hasta llegar al océano (Brutsaert, 2005; Chow, Maidment, y Mays, 1988; Maidment, 1992). El caudal de un afluente es alimentado por la escorrentía superficial, flujo subsuperficial y flujo base procedente del agua subterránea (Mosley y McKerchar, 1992).

El ciclo hidrológico es de fácil concepto, pero su complejidad es alta, debido a que está compuesto por muchos ciclos que se relacionan entre sí y que tienen una extensión desde lo local hasta lo continental (Chow *et al.*, 1988; Lundin,

Bergström, Eriksson, y Seibert, 2000). Este ciclo es un sistema compuesto por tres subsistemas; el sistema de agua atmosférica explica los procesos de evaporación, precipitación, intercepción y transpiración. El sistema de agua superficial contiene los procesos de escurrimiento superficial, flujo subterráneo, escorrentía de ríos y océanos. El último es el sistema de agua subsuperficial que se encarga de los procesos infiltración, recarga de agua subterránea, flujo subsuperficial (Breña y Jacobo, 2006; Chow *et al.*, 1988; Meinzer, 1923).

### **1.5. Agua subterránea**

Heath (1983), menciona que el agua subterránea es toda aquella que está por debajo de la superficie de la tierra. El agua subterránea se produce y ocurre en dos zonas (Fitts, 2012; Heath, 1983; Hudak, 2000; Todd y Mays, 2004). Heath (1983); Meinzer (1923); (Şen, 2014) afirman que el termino agua subterránea se aplica para el agua contenida en la zona saturada del suelo.

La zona comprendida entre la superficie terrestre y el nivel freático o tabla de agua contiene aire y agua, y se le denomina zona no saturada, zona de aireación o vadosa (Fetter, 2000; Fitts, 2012; Heath, 1983; Hudak, 2000; Todd y Mays, 2004). En esta zona el movimiento del agua es a favor de la gravedad para recargar el agua subterránea (Harter, 2003) y la presión del agua en los espacios porosos es menor que la presión atmosférica (Fitts, 2012). Esta primera zona está dividida en tres partes: del suelo, intermedia y la franja capilar (Heath, 1983; Meinzer, 1923; Todd y Mays, 2004).

El espesor de la zona del suelo depende del tipo de suelo y la vegetación existente, ya que esta se extiende hasta la zona de mayor densidad de raíces. La humedad del suelo en esta franja es quien suple de agua a las raíces, y puede

llegar a estar en saturación temporalmente por agua de lluvia o riego (Todd y Mays, 2004).

La zona intermedia se encuentra entre la zona del suelo y la franja capilar y ayuda a la conexión de la tabla de agua con la zona de raíces. En esta zona el agua inmóvil la mantienen las fuerzas capilares e higroscópicas (Todd y Mays, 2004).

La franja capilar es una zona de transición entre la zona saturada y no saturada; en esta el agua se mueve en dirección opuesta a la gravedad; porque el agua se adhiere a las rocas y se mueve hacia arriba, a través de los poros de menor tamaño (Heath, 1983). Es una zona que está saturada de agua asignada a la zona no saturada, a pesar de poseer características físicas similares a la zona saturada; y su espesor depende del tamaño del medio poroso (Fitts, 2012).

La otra zona del suelo es aquella que tiene sus espacios porosos llenos de agua y se le conoce como zona saturada, en esta la presión del agua es superior a las presión atmosférica (Fetter, 2000; Fitts, 2012; Heath, 1983). El agua subterránea (zona saturada) es la única que está disponible para alimentar los pozos y manantiales (Heath, 1983). El nivel superior de la zona saturada corresponde al nivel freático o tabla de agua (superficie libre), donde la presión atmosférica es igual a la presión hidráulica (Barrocu, 2014; Fitts, 2012; Heath, 1983).

## **1.6. Acuífero**

Todd y Mays (2004), indica que el agua subterránea puede ocurrir en muchos tipos de formaciones geológicas. Estas se pueden clasificar en función



de la facilidad de transmisión del agua y la variabilidad natural de la permeabilidad en los materiales geológicos (Hiscock, 2014). Por su parte Şen (2014), menciona que es la transmisión y el almacenamiento quienes determinan el tipo de formación geológica en tres unidades hidrogeológicas: acuífero, acuitardo y acuícludo.

El acuífero es una formación geológica o estrato que puede estar compuesto por una o varias capas de rocas o sedimentos y es capaz de contener o almacenar agua (Fetter, 2000; Han, 2010; Hiscock, 2014; Şen, 2014; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012), y tiene la habilidad para transmitirla bajo un gradiente hidráulico en grandes cantidades (Fetter, 2000; Hiscock, 2014; Nonner y Nonner, 2002; Pinder y Celia, 2006; Şen, 2014; Todd y Mays, 2004; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012); un acuífero puede proporcionar agua aprovechable en cantidades significativas para su extracción, a través de pozos (Şen, 2014; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012), y el volumen extraído puede satisfacer una demanda específica para uso humano (Pinder y Celia, 2006).

Mientras que un acuitardo posee baja conductividad hidráulica (permeabilidad) y por ende transmite agua a tasas más lentas que un acuífero (Hiscock, 2014; Şen, 2014; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012). El acuícludo que tiene la capacidad para absorber agua lentamente y contenerla (Pinder y Celia, 2006; Şen, 2014), debido a poseer muy baja permeabilidad (Nonner y Nonner, 2002; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012); lo que resulta en su incapacidad para transmitir cantidades significativas de agua, y puede actuar como barrera regional del flujo de agua subterránea (Hiscock, 2014).

## **1.7. Parámetros hidrogeológicos**

Hudak (2000), afirma que existen propiedades físicas del acuífero responsables de la capacidad de este para almacenar, transmitir y producir agua subterránea. Estas propiedades se describen a continuación.

### **1.7.1. Porosidad**

La porosidad total ( $n$ ) de un material representa la fracción de volumen de éste que está ocupada por espacio vacío (Hiscock, 2014). La mayoría de materiales en la Tierra presentan valores de porosidad total entre 0 y 60 % (Hudak, 2000). Por otro lado, la porosidad efectiva (*Effective porosity*,  $n_e$ ), es aquella porosidad disponible para el flujo; esta excluye aquellos poros que no tienen el diámetro para conectar moléculas de agua y poros que no están interconectados, la porosidad efectiva no excede la porosidad total (Fetter, 2000). Mientras que la porosidad eficaz (*Specified Yield*), es la proporción entre el volumen de agua drenada por gravedad por el volumen total de una muestra del acuífero (Hudak, 2000).

### **1.7.2. Permeabilidad intrínseca**

Esta “mide la habilidad de un medio poroso para transmitir fluidos” (Hudak, 2000, p. 37). Por lo tanto, es una propiedad del medio e independiente al fluido, que el intemperismo y fracturamiento puede modificar.

### **1.7.3. Conductividad hidráulica**

Según Fitts (2012), esta “es una medida de la facilidad con la cual un medio transmite agua”. Esta propiedad física considera la permeabilidad del acuífero o medio y el fluido que se transmite a través de él. Sus valores varían desde  $10^{-9}$  m d<sup>-1</sup> para rocas ígneas, hasta 1000 m d<sup>-1</sup> para grava y caliza (Hudak, 2000; Poehls y Smith, 2011). Altos valores de conductividad hidráulica están asociados a materiales que transmiten agua con mayor facilidad, y viceversa valores bajos (Fitts, 2012).

### **1.7.4. Transmisividad**

Fitts (2012, p. 68), menciona que “la transmisividad es una medida de la facilidad con que una capa transmite agua”. En la práctica esta es el resultado de medir la conductividad hidráulica como parámetro integrado sobre el espesor de una capa dada ( $T = k * b$ ).

### **1.7.5. Coeficiente de almacenamiento**

En un acuífero, este se refiere al volumen de agua liberada ( $\Delta V$ ) por unidad de área horizontal ( $A$ ) de acuífero, por unidad de disminución de la carga o cabeza hidráulica ( $\Delta H$ );  $S = \frac{\Delta V}{A(\Delta H)}$ .

### **1.7.6. Tabla de agua**

Esta es una superficie ondulada donde la presión del agua contenida en los poros es igual a la presión atmosférica, también se le conoce como nivel freático (Fetter, 2000).

### **1.8. Heterogeneidad y anisotropía**

De las características de las formaciones geológicas la que le confiere la característica de transmisión es la conductividad hidráulica (Şen, 2014); esta presenta variabilidad natural espacial (de ubicación) y en las tres direcciones del plano cartesiano (Hiscock, 2014; Hudak, 2000; Şen, 2014). Además de la conductividad hidráulica existen otras propiedades geológicas que presentan la variabilidad mencionada, como el almacenamiento específico y espesor (Fetter, 2000).

Cuando existe variación espacial de la conductividad hidráulica y otras propiedades de las formaciones geológicas se dice que el medio geológico es heterogéneo (Fetter, 2000; Fitts, 2012; Hiscock, 2014; Şen, 2014); y cuando no existe dicha variación espacial es un medio homogéneo (Fitts, 2012; Hiscock, 2014; Nonner y Nonner, 2002; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012).

Mientras que la anisotropía se presenta cuando las características geológicas varían, según la dirección que se midan a partir de un punto dado, si en ese punto varía con respecto a los otros dos ( $k_x \neq k_y \neq k_z$ ); es un punto anisotrópico (Hiscock, 2014; Pinder y Celia, 2006; WMO-UNESCO2012). Cuando la conductividad hidráulica es independiente de la dirección en que se mida en

un punto dado el medio es isotrópico (Fetter, 2000; Fitts, 2012; Hiscock, 2014; Nonner y Nonner, 2002; Pinder y Celia, 2006; Şen, 2014). La existencia de heterogeneidad y anisotropía es un indicador de “variabilidad en la escala de tiempo y espacio, y de los procesos geológicos que dan lugar a su formación” (Şen, 2014, p. 85).

### **1.9. Carga hidráulica**

Según Şen (2014, p. 47), la carga hidráulica es la “altura a la que el agua puede elevarse en un piezómetro o en un pozo con relación a un punto de referencia”; en mecánica de fluidos está representada por la sumatoria de altura geométrica, de presión y de velocidad (Heath, 1983; World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012). Aunque Heath (1983), afirma que debido al movimiento relativamente lento del agua subterránea para obtener su carga hidráulica total se desprecia la velocidad, quedando así:

$$h_t = z + h_p$$

Donde:  $h_t$ , representa la carga hidráulica total;  $z$ , elevación desde el datum de referencia hasta el punto donde se determina la presión de carga ( $h_p$ ). La carga hidráulica o nivel del agua en un pozo freático (acuífero libre) indica la posición de la tabla de agua en el acuífero; mientras que dicha carga hidráulica en un pozo artesiano (acuífero confinado) se ubica al nivel de la altura de la superficie piezométrica (Heath, 1983).

### **1.10. Gradiente hidráulico**

Heath (1983), define el gradiente hidráulico como “el cambio en la carga hidráulica por unidad de distancia en una sección dada”. También se dice que es

la “disminución de la carga hidráulica por unidad de longitud en la dirección del flujo en una conducción, un cauce abierto o un medio poroso” (World Meteorological Organization y United Nations Educational, 2012, p. 163). Es decir que si al trazar una línea recta entre dos piezómetros o pozos, y resulta una línea horizontal con respecto al nivel básico de referencia (z), se dice que el agua subterránea se encuentra en estado estático, pero si la línea no es horizontal existirá una pendiente hidráulica que favorecerá el flujo del agua (Şen, 2014).

Esta pendiente o gradiente hidráulico de la tabla de agua en un acuífero libre o de la superficie piezométrica en un acuífero confinado indican la dirección de movimiento del agua subterránea, la velocidad de movimiento de este fluido depende del gradiente hidráulico, sin este no existe un caudal (Heath, 1983; Şen, 2014).

### **1.11. Modelación hidrológica de la recarga hídrica**

Los modelos hidrológicos constituyen una clase importante de método de balance de agua, y se aplican a diversas escalas espaciales; existiendo modelos distribuidos y agrupados. Es claro que los modelos requieren información de ingreso como el clima, uso de la tierra, y caudales observados para calibración (Anderson y McDonnell, 2005).

Es así, como la herramienta SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), básicamente es un modelo conceptual (J. G. Arnold, Srinivasan, Muttiah, y Williams, 1998) que es semidistribuido (J. Arnold *et al.*, 2012), a escala de cuenca y de tiempo continuo; que es potencialmente utilizado predecir la producción de agua, sedimentos, nutrientes y contaminantes de tipo agrícola (J. Arnold *et al.*, 2012; Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams, y King, 2005). En el modelo SWAT la recarga hídrica de los acuíferos se calcula con base a la ecuación 1.

$$w_{rchrg,i} = \left( 1 - \exp \left[ -\frac{1}{\delta_{gw}} \right] \right) * w_{seep} + \exp \left[ -\frac{1}{\delta_{gw}} \right] * w_{rchrg,i-1} \quad (1)$$

Donde  $w_{rchrg,i}$  es la recarga para los acuíferos en el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);  $\delta_{gw}$  tiempo de desfase (días);  $w_{seep}$  agua percolada en el perfil del suelo;  $w_{rchrg,i-1}$  recarga de los acuíferos en el día  $i - 1$  (Neitsch *et al.*, 2005).

### 1.12. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas

Existen tres categorías generales de enfoques para estudiar la vulnerabilidad de contaminación de un acuífero, siendo éstos los métodos de superposición e índices, métodos estadísticos y métodos físicamente basados en procesos (Zhang *et al.*, 1996). Los métodos de superposición e índices, son los de mayor uso a gran escala, asimismo fue el primero en usarse para evaluar la vulnerabilidad (Iqbal *et al.*, 2012).

Los métodos de superposición elaboran índices con base a combinación de variables con diferente aporte relativo en función de la variabilidad espacial, que contribuyen a la vulnerabilidad del agua subterránea a ser contaminada (Gurdak, 2014; Iqbal *et al.*, 2012). Actualmente, existe una variedad de índices de superposición utilizados alrededor del mundo, por ejemplo, DRASTIC, SEEPAGE, GOD, AVI, EPIK, IS, entre otros.

### 1.12.1. Método DRASTIC

El método DRASTIC se basa en siete parámetros hidrogeológicos para evaluar el potencial de contaminación de las aguas subterráneas (Iqbal *et al.*, 2012). Dichos parámetros incorporan los principales factores que afectan y controlan el movimiento del agua subterránea; profundidad del agua, recarga hídrica neta, medio del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica, los que dan origen al acrónimo DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) (Fig. 1).

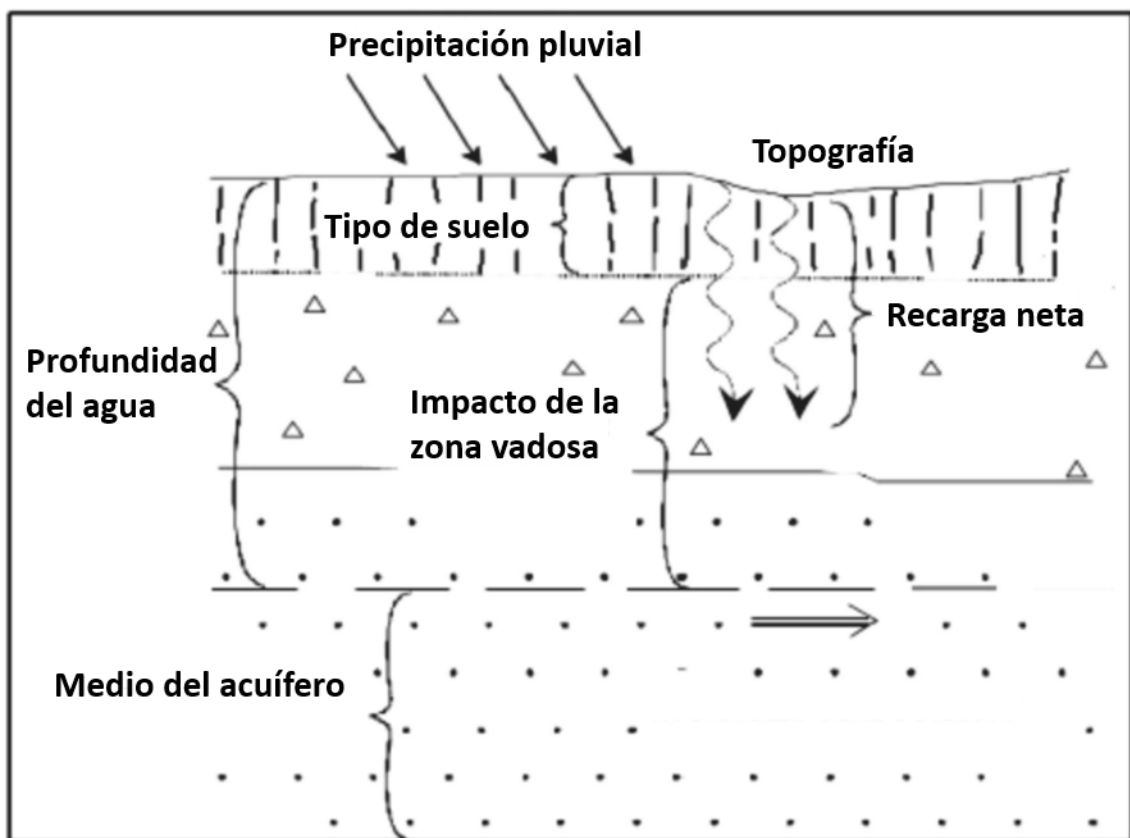


Figura 1. **Parámetros hidrogeológicos considerados por el método DRASTIC.**

Fuente: Tomado y traducido de Iqbal *et al.* (2012, p. 108)



Para obtener un valor numérico del índice DRASTIC se utiliza una combinación valores de clasificación y ponderaciones, que dan lugar a un sistema de clasificación relativo que crea unidades de vulnerabilidad a graficar en un mapa (Ec. 2) (Aller *et al.*, 1987).

$$V = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (2)$$

Donde,  $V$ , es el potencial de contaminación; los subíndices R y W, son el valor de clasificación y peso, respectivamente. Según, Aller *et al.* (1987) el método DRASTIC considera los siguientes supuestos:

- El contaminante se introduce en la superficie del suelo.
- El contaminante se descarga en el agua subterránea por precipitación pluvial.
- El contaminante tiene la movilidad del agua.
- El área evaluada por el método DRASTIC es de igual o mayor a 40.47 hectáreas.

### **1.12.2. Limitaciones y ventajas del método DRASTIC**

El índice DRASTIC únicamente brinda una medida de la susceptibilidad o vulnerabilidad intrínseca del sistema de aguas subterráneas. Esto se debe a que únicamente considera propiedades del acuífero, fuente del agua y tensiones asociadas al sistema; y no incluye en el análisis la ubicación y tipo de contaminación (Focazio *et al.*, 2002).

Panagopoulos, Antonakos, y Lambrakis (2006), mencionan que la incertidumbre en la determinación de los valores de clasificación y los pesos es el mayor inconveniente de este método. Además de lo anterior, el método DRASTIC ha sido criticado por sobreestimar la vulnerabilidad en acuíferos porosos en comparación a los fracturados, y da la impresión de no considerar la sorción y dilución; aunque si lo menciona en el desarrollo de los valores de clasificación y pesos (Rosen, 1994). Por otro lado, este tipo de método no son probabilísticos y por tanto, su capacidad es limitada (Merchant, 1994); esto es de importancia en la interpretación de sus resultados.

En general, los métodos de superposición son de fácil aplicación, siempre y cuando los datos lo estén, ya que incluyen parámetros de importancia en la contaminación, teniéndose claro que no buscan describir los procesos de contaminación (Iqbal *et al.*, 2012).

### **1.13. Sensibilidad de capas espaciales**

Existen métodos para realizar análisis de sensibilidad del potencial de vulnerabilidad a contaminación, entre ellos está el método de sensibilidad de eliminación de capas (Lodwick, Monson, y Svoboda, 1990), con ésta se evalúa la calidad y confiabilidad de las conclusiones obtenidas de la estimación de la vulnerabilidad. Además, estudia el efecto de las perturbaciones de los parámetros o capas de entrada en el resultado geográfico final.

Un segundo método, es el análisis de sensibilidad de un solo parámetro (SPSA), el cual estudia el impacto que tiene cada parámetro o capa en el índice de vulnerabilidad a contaminación; esto lo realiza comparando la ponderación o peso teórico de cada parámetro con el peso efectivo (Napolitano y Fabbri, 1996).



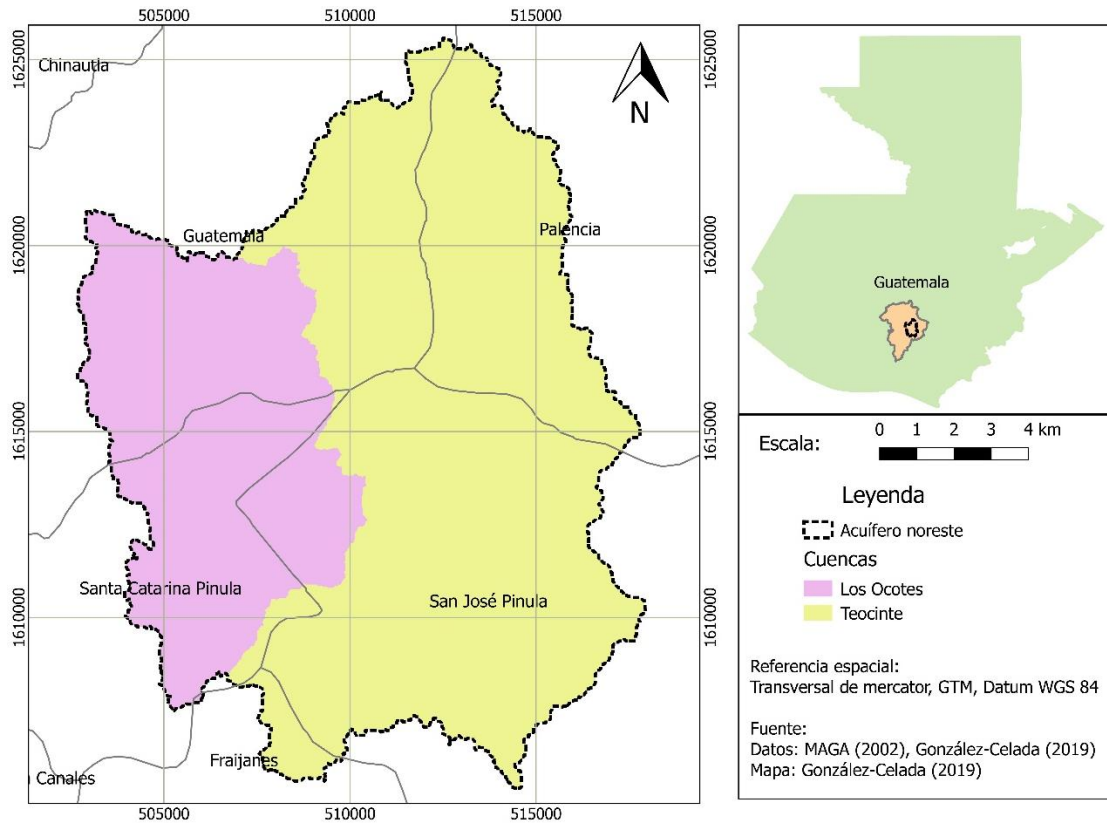
## 2. MÉTODOS Y MATERIALES

### 2.1. Área de estudio

El acuífero noreste de ciudad Guatemala tiene correspondencia espacial con la cuenca de drenaje de los ríos Los Ocotes y Teocinte, con una superficie de 198.72 km<sup>2</sup>, donde convergen los municipios Guatemala, Santa Catarina Pinula, San José Pinula, Palencia y Fraijanes (Fig. 2). Los ríos antes mencionados desembocan en el río las Cañas, y este al río Motagua de la vertiente del Caribe (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016).

La elevación máxima y mínima de la superficie es 2,492 y 988 metros sobre el nivel del mar (msnm), mientras que su elevación media es 1619 msnm. Las coordenadas al centroide de este acuífero son 90.40205° de longitud oeste y 14.60409° de latitud norte.

El uso/cobertura de la tierra está representado por bosques, cultivos anuales, pastizales, zona urbana, matorrales, cultivo de café y cuerpos de agua (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, 2014). En la cuenca hidrográfica del río Los Ocotes, la precipitación media anual en la parte alta es 1386.3 mm y en la parte baja 1318.4 mm (Herrera Ibáñez, 2012).



**Figura 2. Acuífero noreste de ciudad de Guatemala.**  
Fuente: elaboración propia

## 2.2. Métodos para determinar los factores del índice DRASTIC (OE 1)

Los procesos de digitalización, georreferenciación, clasificación, ponderación y sumatoria de capas, para cada parámetro del índice DRASTIC se realizó en la interfaz del programa computacional de sistemas de información geográfica QGIS versión 2.6.1, el cual es de libre acceso. A continuación se describen los métodos para determinar los parámetros, espacialmente, necesarios para aplicar el modelo DRASTIC; donde, en su mayoría se establecieron con base a información existente.

### 2.2.1. Profundidad del agua (D)

Para producir el mapa de profundidad del agua se digitalizó y georreferenció la base de datos de pozos del estudio hidrogeológico de Herrera Ibáñez (2012), realizado en la subcuenca del río Los Ocotes. Así mismo, el mapa de isopiezas del acuífero noreste trazado por Herrera Ibáñez *et al.* (2016). También, un pozo del análisis piezométrico realizado por Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala (2019), los pozos profundos del reconocimiento hidrogeológico realizado por Instituto Geográfico Nacional (1973), un pozo del estudio de aguas subterráneas del valle de Guatemala que ejecutó el Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología (1978). Otro pozo del estudio de aguas subterráneas que realizó la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (1995). Asimismo, el inventario de pozos de la Municipalidad de Palencia (2018).

Otra fuente de información utilizada de referencia fue el mapa de líneas de igual nivel freático del Estudio de Factibilidad del Proyecto Emergencia I de la ciudad Guatemala (Japan International Cooperation Agency, 1986).

Para obtener la profundidad del nivel del agua con respecto a la superficie terrestre se aplicó álgebra de mapas entre el atributo elevación del modelo de elevación digital (MED) con resolución espacial 15 m, y la altura del nivel estático del agua en los pozos e isopiezas. Luego, se construyó una capa vectorial de puntos con la profundidad del nivel de agua. Finalmente, se realizó interpolación espacial por el método de distancia inversa ponderada (IDW); donde el ráster resultante se reclasificó de acuerdo a los valores de clasificación propuestos por Aller *et al.* (1987) (Tabla I).

Tabla I. Valores de clasificación para el factor D

Profundidad (m)	Valor de clasificación
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 21)

## 2.2.2. Recarga neta (R)

Este parámetro se estimó por el método de modelación hidrológica, donde la herramienta utilizada fue SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*); en su versión QSWAT 1.7 para el programa de acceso libre QGIS v 2.6.1. El período de simulación fue de 19 años (1995 a 2013), con dos años de calentamiento, y paso de tiempo a escala mensual.

### 2.2.2.1. Información de ingreso

Los datos físicamente basados que requiere SWAT como elementos de entrada fueron obtenidos de diferentes fuentes. Para el tipo de suelo se usó el estudio semidetallado de suelos del departamento de Guatemala a escala 1:50,000 (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo, 2017). Mientras que, la cobertura de la tierra, del mapa de bosques y uso de la tierra a escala 1:50,000 (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, 2014), y

del mapa forestal por tipo y subtipo de bosque a escala 1:25,000 (Instituto Nacional de Bosques y Consejo Nacional de Áreas Protegidas, 2015). Se utilizó el modelo de elevación digital (MED) con resolución espacial 15 m, para la topografía (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, 2010) (Fig. 3).

En cuanto a la meteorología, se utilizaron seis variables, precipitación pluvial, temperatura mínima y máxima, brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento, a escala diaria de la estación meteorológica central del Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología (2018); donde se usaron 19 años de registro, del 01 de enero de 1995 al 31 de diciembre de 2013. El porcentaje de datos faltantes de las seis variables meteorológicas en el período antes indicado se compuso de la siguiente manera: precipitación pluvial, temperatura mínima y máxima, y humedad relativa menos del 1 %; mientras que la velocidad del viento 6.5 %; y radiación solar 11.83 %.

Los datos de otras estaciones de la red del INSIVUMEH ubicadas en las cercanías del acuífero bajo estudio (San Pedro Ayampuc y San José Pinula) no se consideraron, debido a la falta de continuidad de datos históricos, alto porcentaje de datos faltantes, y falta de emparejamiento con el período de 19 años previamente indicado. También se evaluaron dos estaciones meteorológicas de *Climate Forecast System Reanalysis (Fuka et al., 2014)*, las cuales no se utilizaron por sobreestimar la precipitación pluvial.

Los datos de caudales observados mensuales para calibrar el modelo hidrológico se obtuvieron del estudio hidrogeológico de Herrera Ibáñez (2012); quien midió y registró esta variable de mayo de 2009 a abril de 2011.



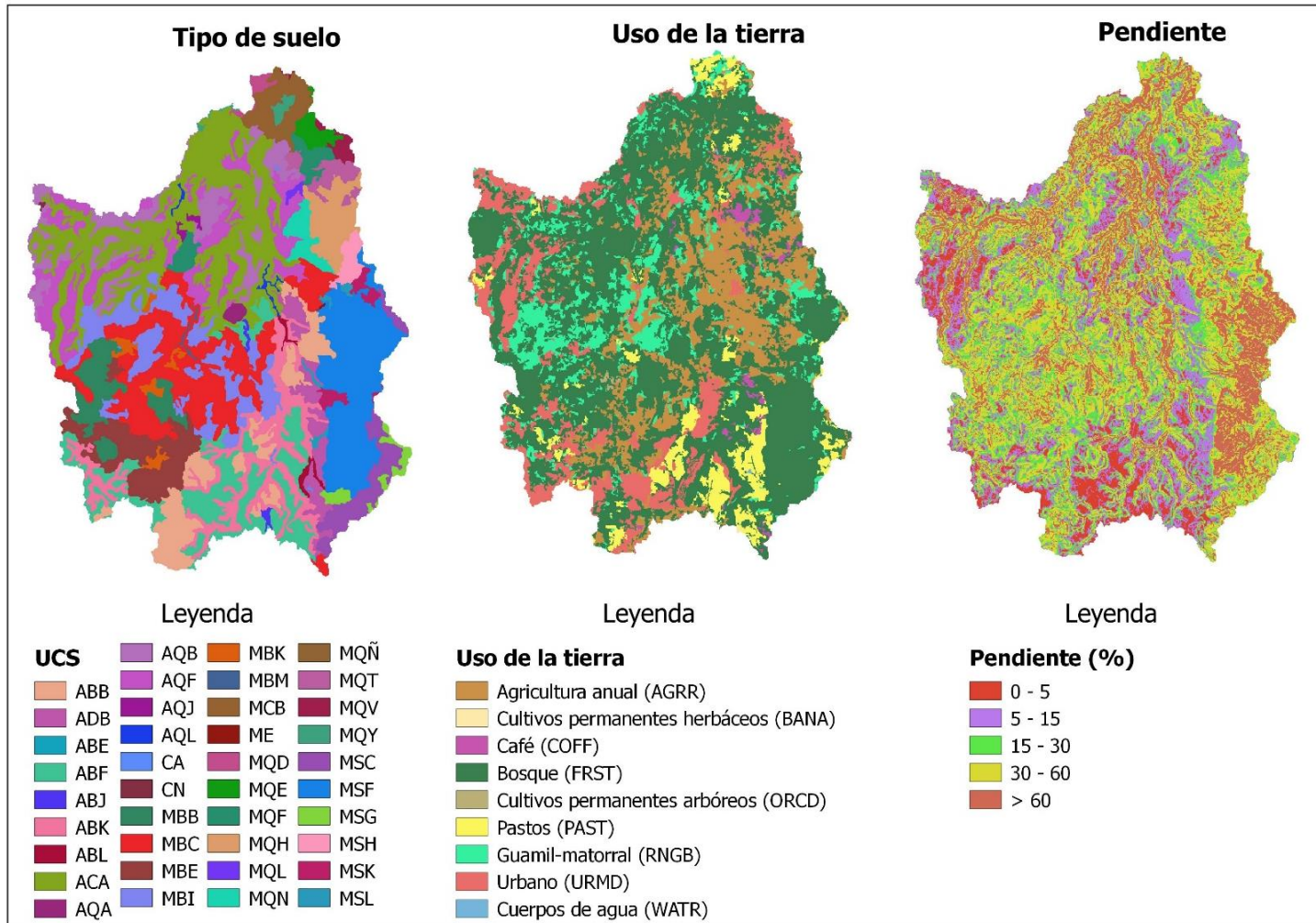


Figura 3. Suelos, uso/cobertura de la tierra y topografía usados de entrada en la herramienta SWAT, para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. UCS son unidades cartográficas de suelo (Anexo 1)

### 2.2.2.2. Configuración de SWAT

En la herramienta SWAT se configuró el modelo hidrológico optando por el método de la curva número, para modelar la escorrentía superficial (Mockus, 1972). Mientras que para calcular la escorrentía subsuperficial, se eligió el modelo cinemático de almacenamiento (Sloan y Moore, 1984), y el flujo base a través de ecuaciones matemáticas que relacionan las propiedades del acuífero y variaciones en la tabla del agua (Neitsch *et al.*, 2005). El método de pérdidas por transmisión se utilizó para obtener las pérdidas de trasmisión en el canal (Lane, 1983). Mientras que la recarga hídrica de los acuíferos se computará con base a la ecuación 1.

Es así como integrando los flujos anteriores, la herramienta SWAT calcula la producción de agua (*WYLD*), con la siguiente expresión  $WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS$ . Donde *SURQ* es la escorrentía superficial, *LATQ* escorrentía subsuperficial, *GWQ* es el flujo base y *TLOSS* las pérdidas por abstracción (Neitsch *et al.*, 2005).

Por otro lado, el método de enrutamiento o tránsito en el canal definido fue el de Muskingum. El método de evapotranspiración potencial utilizado fue el de Penman-Monteith (Allen, 2006). Mientras que la evapotranspiración real o actual, SWAT la calcula por ecuaciones matemáticas exponenciales y lineales; con las cuales se computa la evaporación del dosel, evaporación del suelo y transpiración de la vegetación (Neitsch *et al.*, 2005).

Se realizó ajuste previo a calibración de algunos parámetros, es así como datos de extracción por bombeo del acuífero superficial se ingresaron a la base de datos de uso del agua; estos fueron obtenidos de información local (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar

y The Nature Conservancy, 2012; Municipalidad de Palencia, 2018). Otro uso del agua ingresado fue el de extracción de agua de la red hídrica, ya que en el río Teocinte se ubica la presa del mismo nombre y en el río Los Ocotes, la presa Acatán, ambas derivan agua hacia la planta Santa Luisa que abastece a la ciudad de Guatemala (Bernal Reyes, 2010).

### **2.2.2.3. Calibración**

La calibración y análisis de incertidumbre se llevó a cabo por el algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting Version 2*) (K. Abbaspour, Johnson, y Van Genuchten, 2004; K. C. Abbaspour *et al.*, 2007). Éste viene integrado en el programa computacional SWAT-CUP versión 5.2.1 de acceso libre (*SWAT Calibration, Uncertainty Procedures*) (K. Abbaspour, 2015). SUFI-2 es un algoritmo de modelación inversa semiautomatizada que realiza calibración, análisis de sensibilidad y de incertidumbre (K. Abbaspour *et al.*, 2004; K. C. Abbaspour *et al.*, 2007).

El proceso de calibración, análisis de sensibilidad e incertidumbre se realizó entre el caudal observado y simulado por SWAT; en la salida de la cuenca Los Ocotes. El período de calibración fue dos años, de mayo de 2009 a abril de 2011. La función objetivo para medir el ajuste hidrológico definida fue el criterio de Gupta, Kling, Yilmaz, y Martinez (2009); este estadístico optimiza el criterio de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970). El número de iteraciones ejecutadas para la calibración y análisis de incertidumbre y sensibilidad fueron dos, y el número de simulaciones 500. Mientras que se usó el método de sensibilidad global de SUFI-2, con base a prueba de t para cada parámetro (K. C. Abbaspour *et al.*, 2007). Se usaron 10 parámetros de calibración con sus respectivos rangos de calibración (Tabla II).

Tabla II. Rangos de calibración de parámetros con el algoritmo SUFI-2, para la variable caudal, en la salida de la cuenca Los Ocotes

Parámetro	Descripción	Rango de calibración
CN2.mgt	Curva número para condición de humedad II.	-0.17 a 0.02
ALPHA_BF.gw	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo, 1/días.	0.34 a 1
GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo para recarga del acuífero, días	0 a 244.07
ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo	0.2 a 0.75
CH_N2.rte	Coeficiente "n" de Manning para el canal principal	0.14 a 0.3
SOL_K ().sol	Conductividad hidráulica saturada, mm/h	-0.8 a -0.01
CH_K1.sub	Conductividad hidráulica efectiva en el canal tributario, mm/h	17.08 a 55.42
RCHRG_DP.gw	Coeficiente de percolación del acuífero profundo.	0.4 a 1
SOL_BD ().sol	Densidad aparente del suelo, g/cm <sup>3</sup>	-0.1 a 0.14
OV_N.hru	Coeficiente "n" de manning para flujo superficial	-0.73 a 13.76

#### 2.2.2.4. Extracción de valores de recarga hídrica

Luego se procedió a extraer y visualizar la modelación de la recarga hídrica de los acuíferos; donde el producto obtenido fue una capa vectorial con datos de la variable en mención. Finalmente, esta capa se reclasificó con base a la clasificación de Aller *et al.* (1987) (Tabla III).

Tabla III. Valores de clasificación de recarga neta

Recarga (mm)	Valor de clasificación
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 - 254	8
> 254	9

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 21)

### 2.2.3. Medio del acuífero (A)

Para elaborar el mapa de este parámetro se digitalizó y georreferenció el mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero noreste y sus respectivos perfiles hidrogeológicos (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016). Otros elementos útiles para la caracterización de este parámetro lo constituyeron las informaciones siguientes, perfil hidrogeológico del río Los Ocotes (Ckc Chuo Kaihatsu Corporation, 1995), perfil litológico del pozo Puerta Parada (Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología, 1978), estratigrafía del acuífero superior de un pozo ubicado en San José Pinula (Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 1995), mapa de unidades hidrogeológicas de Guatemala (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección General de Servicios Agrícolas; Dirección Técnica de Riego y Avenamiento, 1991), y perfiles hidrogeológicos del río Pinula (Manzo Barrientos, 2008).

Posteriormente, a partir de la descripción de perfiles hidrogeológicos disponibles en el área se asignó el tipo de litología al acuífero en el mapa de unidades hidrogeológicas, en este proceso se auxilió del uso del relieve. Finalmente a cada tipo de litología se clasificó con base a los valores de clasificación para el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) (IV).

Tabla IV. Valores de clasificación de medio del acuífero

Litología	Valor	Valor típico
Lutita masiva	1-3	2
Metamórfica/ígnea	2-5	3
Metamórfica/ígnea meteorizada	3-5	4
Secuencia de arenisca, caliza y lutita	4-6	6
Arenisca masiva	5-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Grava o Arena	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Caliza kárstica	9-10	10

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 22)

#### 2.2.4. Medio del suelo (S)

Este parámetro se obtuvo del análisis comparativo de texturas de los horizontes de suelo de cada unidad cartográfica de suelo (UCS) del estudio semidetallado de suelos (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo, 2017); asignando a cada UCS la clase textural más importante que influirá en el movimiento del agua y del contaminante. Luego, se clasificó cada clase textural asignada con base a los valores de clasificación de Aller *et al.* (1987) (Tabla V).

Tabla V. Clasificación del medio del suelo

Medio del suelo	Valor de clasificación
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 22)

### 2.2.5. Topografía (T)

La topografía del acuífero noreste de la ciudad capital se obtuvo del procesamiento del modelo de elevación digital con resolución espacial de 15 m. En QGIS v 2.6.1 se calculó la pendiente en porcentaje, y luego se reclasificó de acuerdo a la valoración propuesta por Aller *et al.* (1987) (Tabla VI).

**Tabla VI. Valoración de parámetro topografía**

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Valor de clasificación</b>
0 – 2	10
3 – 6	9
6 – 12	5
12 - 18	3
> 18	1

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 23)

### 2.2.6. Impacto de la zona vadosa (I)

El parámetro impacto de la zona vadosa, al igual que el parámetro medio del acuífero (A), se caracterizó con base al mapa de unidades hidrogeológicas y perfiles hidrogeológicos del acuífero noreste de ciudad de Guatemala (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016), e información local generada en otros estudios (Ckc Chuo Kaihatsu Corporation, 1995; Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología, 1978). Las unidades de material geológico de la zona vadosa definidas se clasificaron con los valores de este parámetro para el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) (Tabla VII).

Tabla VII. **Clasificación del impacto de la zona vadosa**

<b>Característica de la zona no saturada</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor típico</b>
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4-8	6
Arena o grava	4-8	6
Metamórfica/ígneas	2-8	4
Grava y arena	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	8-10	10

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 24)

### **2.2.7. Conductividad hidráulica (C)**

La información de conductividad hidráulica fue tomada de varios estudios. La Agencia de Cooperación Internacional del Japón (1995), provee los resultados de la prueba de bombeo y del sondeo de resistividad eléctrica de un pozo en San José Pinula; obteniéndose la conductividad hidráulica, a partir de la transmisividad y espesor del acuífero. El valor de conductividad hidráulica para un pozo ubicado en la Finca El Sintul es igual a  $15 \text{ m-día}^{-1}$ , el autor asume espesor saturado igual a 80 m (Herrera Ibáñez, 2012). Datos de prueba de bombeo para un pozo en Puerta Parada (Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología, 1978); y otro pozo en la cabecera de Santa Catarina Pinula (Manzo Barrientos, 2008). Adicionalmente, se consideró el inventario de pozos de la Municipalidad de Palencia (2018). El espesor saturado del acuífero noreste de ciudad Guatemala, es mayor de 200 m, según Herrera Ibáñez *et al.* (2016).



También, se utilizó como referencia el mapa de unidades hidrogeológicas de Guatemala, ya que brinda rangos de transmisividad (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección General de Servicios Agrícolas; Dirección Técnica de Riego y Avenamiento, 1991). Luego, los valores de conductividad hidráulica se asignaron a las unidades litológicas del medio del acuífero (parámetro A), considerando la clasificación de la conductividad hidráulica propuesta por Aller *et al.* (1987) para el método DRASTIC (Tabla VIII).

**Tabla VIII. Clasificación de conductividad hidráulica**

<b>Conductividad hidráulica (m d<sup>-1</sup>)</b>	<b>Valor</b>
0.04 – 4.08	1
4.08 – 12.22	2
12.22 – 28.55	3
28.55 – 40.75	6
40.75 – 81.49	8
>81.49	10

Fuente: Adaptado de Aller *et al.* (1987, p. 25)

### **2.3. Cálculo de la vulnerabilidad espacial a contaminación del acuífero (OE 2)**

#### **2.3.1. Ponderación de factores**

Se utilizó la ponderación para cada parámetro establecida en el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), donde los factores más significativos para el potencial de contaminación tienen un peso establecido de 5, y los de menor importancia, de 1 (Tabla IX).

Tabla IX. **Pesos de los parámetros del índice DRASTIC**

<b>Factor</b>	<b>Ponderación</b>
D	5
R	4
A	3
S	2
T	1
I	5
C	3

Fuente: Aller *et al.* (1987)

### **2.3.2. Operación de pesos y clasificaciones**

Una vez listos los parámetros del índice DRASTIC con sus respectivos valores de clasificación, se procedió a la conversión de cada capa vectorial a formato ráster (rejilla de datos). El campo utilizado para asignar los valores al ráster obtenido fueron los de la clasificación realizada.

Es así como, utilizando la calculadora ráster del programa QGIS v 2.6.1 se calculó el valor numérico del índice DRASTIC; donde los valores de clasificación y ponderaciones de cada parámetro se operaron (Ec. 2).

### **2.3.3. Clasificación de la vulnerabilidad**

La clasificación de los valores numéricos de vulnerabilidad obtenidos se realizó con base en el código de color nacional de los Estados Unidos, recomendado por Aller *et al.* (1987), en la producción de mapas del índice DRASTIC con herramientas de sistemas de información geográfica (Tabla X).

De esta clasificación el autor en mención, indica que los colores rojo, naranja y amarillo representan la mayor vulnerabilidad potencial; mientras que el azul, índigo y violeta son aquellas áreas de menor vulnerabilidad; por su parte, las dos variantes del verde son rangos medios. Finalmente, con el fin de asignarle un potencial de vulnerabilidad a cada código de color, se adaptó la clasificación presentada por Musálem, McDonald, Jiménez, y Laino (2015).

**Tabla X. Código de color nacional para los rangos del índice DRASTIC**

<b>Rango del índice DRASTIC</b>	<b>Color</b>	<b>Potencial de vulnerabilidad</b>
< 79	Violeta	Mínimo
80 - 99	Índigo	Muy bajo
100 – 119	Azul	Bajo
120 – 139	Verde oscuro	Medio-bajo
140 – 159	Verde claro	Medio -alto
160 – 179	Amarillo	Alto
180 – 199	Naranja	Muy alto
> 200	Rojo	Máximo

Fuente: Aller *et al.* (1987, p. 101), y Musálem *et al.* (2015)

También se propone un sistema de clasificación local de acuerdo con los resultados del índice DRASTIC para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala; el cual consistió en dividir el rango de valores en tres intervalos iguales, dando lugar a las categorías de potencial de vulnerabilidad bajo, medio y alto.

#### **2.4. Método para priorizar zonas de vulnerabilidad por influencia antrópica (OE 3)**

La priorización espacial de la vulnerabilidad del acuífero se realizó con base al uso/cobertura de la tierra como parámetro que refleja la influencia de las

actividades antrópicas en la calidad del agua subterránea. La idea central es que a cada uso de la tierra está asociado un conjunto de actividades antrópicas que representan un impulsor de cambio de la calidad del agua subterránea (Muhammad, Zhonghua, Dawood, y Earl, 2015; Musálem *et al.*, 2015). Para ilustrar esto se ha evidenciado que actividades antrópicas como el uso de agroquímicos y vertidos de la producción pecuaria son algunas de las causas más probables de la presencia e incremento de nitratos en un acuífero (Brindha y Elango, 2015; Secunda, Collin, y Melloul, 1998); lo que a su vez resulta en la contaminación de las aguas subterráneas (Gheisari, 2017). También, la disposición de aguas residuales sin tratamiento y un sistema de alcantarillado inadecuado lleva a la alta presencia de coliformes fecales en el agua subterránea (Muhammad *et al.*, 2015).

Con esta priorización se busca mejorar los hallazgos obtenidos de la vulnerabilidad intrínseca por el método DRASTIC (Ribeiro, 2005). Es así como al uso/cobertura de la tierra en la zona de estudio se le asignaron valores de clasificación con respecto a su influencia en el incremento de la contaminación.

Para esto se utilizó dos sistemas de clasificación elaborados por varios autores, y un tercero, propuesto para el presente estudio. La primera clasificación corresponde al método desarrollado por Ribeiro (2005), quien incluye la variable ocupación del suelo con valores de clasificación que van de 0 a 100; para este estudio se dividieron entre 10; al igual que realizó Brindha y Elango (2015). La segunda clasificación, es con base a Secunda *et al.* (1998), quienes también presentan una clasificación para el uso de la tierra, que va de 1 a 10. Por último, se propuso una escala de valores de clasificación para las nueve categorías de uso/cobertura de la tierra en el área de estudio, los cuales van de 1 a 9; representando la mínima y mayor influencia a la vulnerabilidad por actividades antrópicas, respectivamente (Tabla XI).

Tabla XI. **Clasificaciones asignadas al uso/cobertura de la tierra respecto a su influencia en el incremento de la contaminación del acuífero**

<b>Uso</b>	<b>Ribeiro (2005) *</b>	<b>Secunda <i>et al.</i>, (1998)</b>	<b>González-Celada (2019)</b>
Agricultura anual	9	8	9
Cultivos permanentes herbáceos	7	6	5
Café	7	6	4
Bosque	0	1	1
Cultivos permanentes arbóreos	7	6	6
Pastos	5	5	2
Guamil-matorral	5	5	3
Urbano	7	8	8
Cuerpos de agua	0	7	7

(\*) valor modificado del original

Posterior a la clasificación del uso/cobertura de la tierra, se reclasificó las categorías de vulnerabilidad intrínseca obtenidas por el índice DRASTIC, con valores entre 1 y 8, que corresponden al mínimo y máximo potencial de vulnerabilidad (Tabla XII).

Tabla XII. **Valores de reclasificación del potencial a vulnerabilidad**

<b>Rango índice DRASTIC</b>	<b>Potencial de vulnerabilidad</b>	<b>Valor</b>
< 79	Mínimo	1
80 - 99	Muy bajo	2
100 - 119	Bajo	3
120 - 139	Medio-bajo	4
140 - 159	Medio-alto	5
160 - 179	Alto	6
180 - 199	Muy alto	7
> 200	Máximo	8

Finalmente, se operó el producto entre el potencial de vulnerabilidad intrínseca calculada por el índice DRASTIC reclasificado, y el uso/cobertura de la tierra clasificado por los tres criterios previamente indicados (Ec. 3) (Laino, Jiménez, Páez, Casanoves, y Velásquez, 2006); dando lugar a tres mapas de priorización. De esta manera, se obtuvo la zonificación de la vulnerabilidad potencial del acuífero por influencia antropogénica; donde el rango de valores resultantes se clasificó en tres categorías de prioridad, siendo éstas baja, media y alta.

$$V_p = V_{Reclas} * U_{clas} \quad (3)$$

Donde,  $V_p$  es la vulnerabilidad priorizada por el uso/cobertura de la tierra;  $V_{Reclas}$  es la vulnerabilidad intrínseca DRASTIC reclasificada (1-8), y  $U_{clas}$  es el uso/cobertura de la tierra clasificada (1-9)

## **2.5. Método para el análisis de sensibilidad de los parámetros DRASTIC (OE 4)**

El análisis de sensibilidad de un solo parámetro (SPSA) se empleó para medir la influencia o efecto de cada parámetro del índice DRASTIC sobre el mapa o capa final de vulnerabilidad intrínseca.

El análisis de sensibilidad de un solo parámetro mide la influencia que tiene los valores de clasificación y los pesos sobre el índice DRASTIC; obteniéndose pesos o ponderaciones efectivas a través de la ecuación 4 (Napolitano y Fabbri, 1996).

$$W_{pi} = \frac{P_{Ri}P_{Wi}}{V_i} * 100 \quad (4)$$

Donde,  $W_{pi}$  es el peso efectivo o impacto del parámetro sobre el índice DRASTIC;  $P_{Ri}$  valor de clasificación del parámetro;  $P_{Wi}$  peso teórico del parámetro;  $V_i$  es el índice de vulnerabilidad.

### 3. PARÁMETROS DEL MÉTODO DRASTIC

#### 3.1. Profundidad del agua

El mapa de profundidad del agua en el acuífero noreste de la ciudad Guatemala, presentó una profundidad superior a los 30.5 m, casi en su totalidad (Fig. 4). Igualmente, el Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy (2012), presentan que en las cuencas hidrográficas de los ríos Los Ocotes y Teocinte, las cuales corresponden al acuífero en mención, la profundidad del nivel del agua va desde los 30.5 m hasta los 152 m (Los Ocotes), y hasta 106 m (Teocinte).

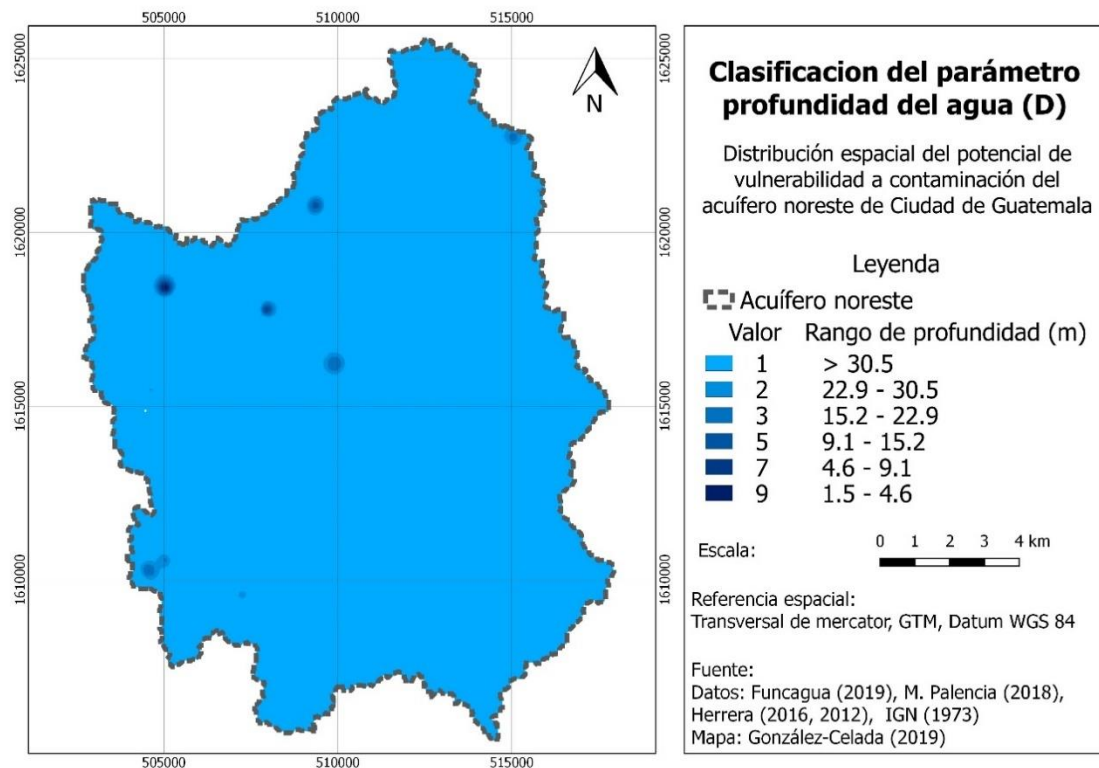


Figura 4. Valores de clasificación para el parámetro profundidad del agua (D), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala.



## **3.2. Recarga neta**

La recarga hídrica neta del acuífero se estimó con la herramienta SWAT, a continuación se presentan los resultados de cada fase hasta la obtención de esta variable hidrológica.

### **3.2.1. Calibración, análisis de incertidumbre y sensibilidad**

La calibración del modelo hidrológico utilizando la variable caudal mensual se ejecutó con 10 parámetros y 500 simulaciones, en un período de 24 meses, en el punto de salida de la cuenca Los Ocotes. Dicha calibración no fue satisfactoria, dado que el criterio de eficiencia KGE fue -0.29. Este valor de KGE indica que el ajuste hidrológico no es bueno, debido a que sus tres componentes (sesgo, variabilidad y coeficiente de correlación) no están próximos a su valor óptimo, el cual es 1. Por su parte, la eficiencia de Nash-Sutcliffe es -3.19; indicando ajuste insatisfactorio de acuerdo a Moriasi *et al.* (2007). El análisis de incertidumbre y fuerza de calibración indican que el error del modelo, en el punto de calibración, es igual al 85 %. Y el análisis de incertidumbre presentó que siete de los diez parámetros de calibración son significativos en el ajuste de los caudales.

Además de esta calibración no satisfactoria y la pobre fuerza de ajuste, se detectó que la correlación entre el caudal simulado sujeto a calibración y la precipitación pluvial es muy pobre, 0.014; mientras que la serie de caudales simulados sin calibración y la misma precipitación pluvial presentaron una alta asociación positiva (0.92), similar a la asociación que presenta los caudales observados (0.94); esto se ve reflejado en el patrón de los datos (Fig. 5). Por tanto, para el presente estudio no se realizó la parametrización del modelo con

base a los factores de ajuste sugeridos por la calibración durante el período de los 24 meses entre 2009 y 2011, previamente indicados.

Esto se justifica porque la herramienta SWAT fue desarrollada para predecir el impacto en la producción de agua, sedimentos y carga de contaminantes; para lograr esto no requiere calibración, proceso que no es posible llevarse a cabo en cuencas sin instrumentación (J. G. Arnold *et al.*, 1998). Esta situación se presenta en los ríos del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, ya que no se dispone de una red de monitoreo de caudales espacial y temporalmente distribuida; además de otras variables ambientales útiles para la alimentación y calibración de modelos hidrológicos.

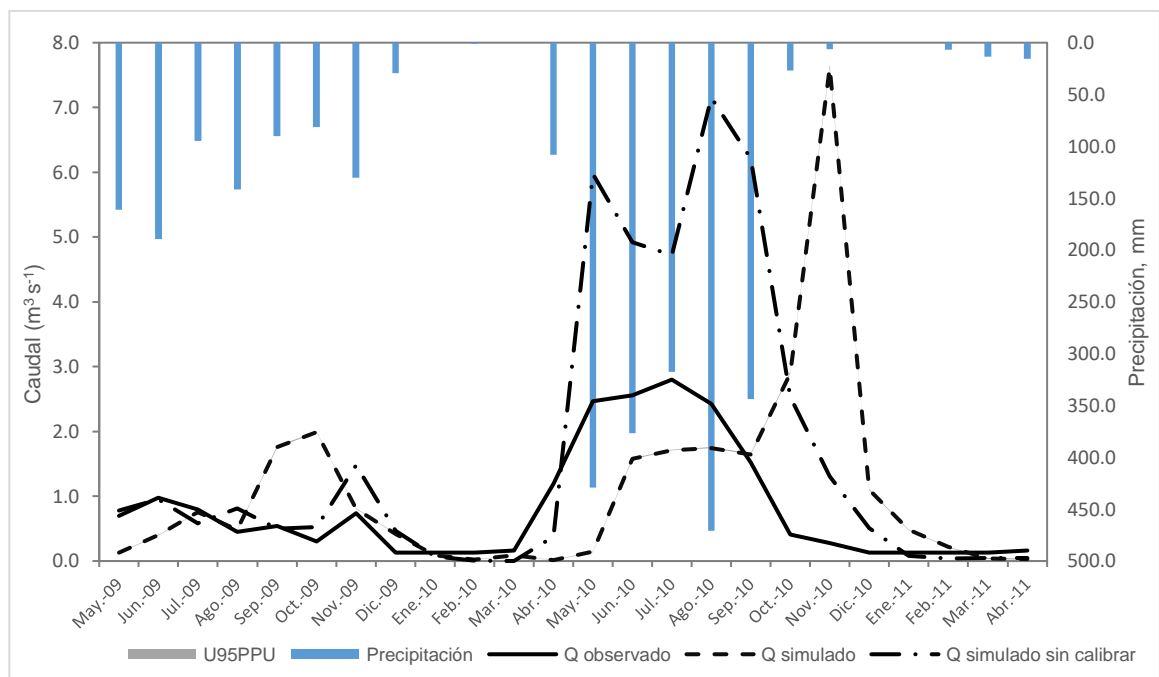


Figura 5. **Calibración en la salida de la cuenca río Los Ocotes (Puente Los Ocotes), acuífero noreste de la ciudad de Guatemala**

### 3.2.2. Recarga simulada

En el acuífero noreste la recarga hídrica media anual multianual (1997 a 2013) estimada con la herramienta SWAT, equivale a  $186 \text{ mm año}^{-1}$ , lo que es igual a 35.161 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ ; de esto las cuencas hidrográficas Los Ocotes y Teocinte aportan 11.657 y 23.504 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ , respectivamente. Comparativamente, la recarga en el acuífero noreste es mayor que la reportada por el Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy (2012), la cual es 27.507 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ ; donde  $6.034 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y 21.473 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$  corresponden a Los Ocotes y Teocinte, respectivamente. Cabe agregar que el autor realizó modelación hidrológica con herramienta WEAP (*Water Evaluation and Planning*).

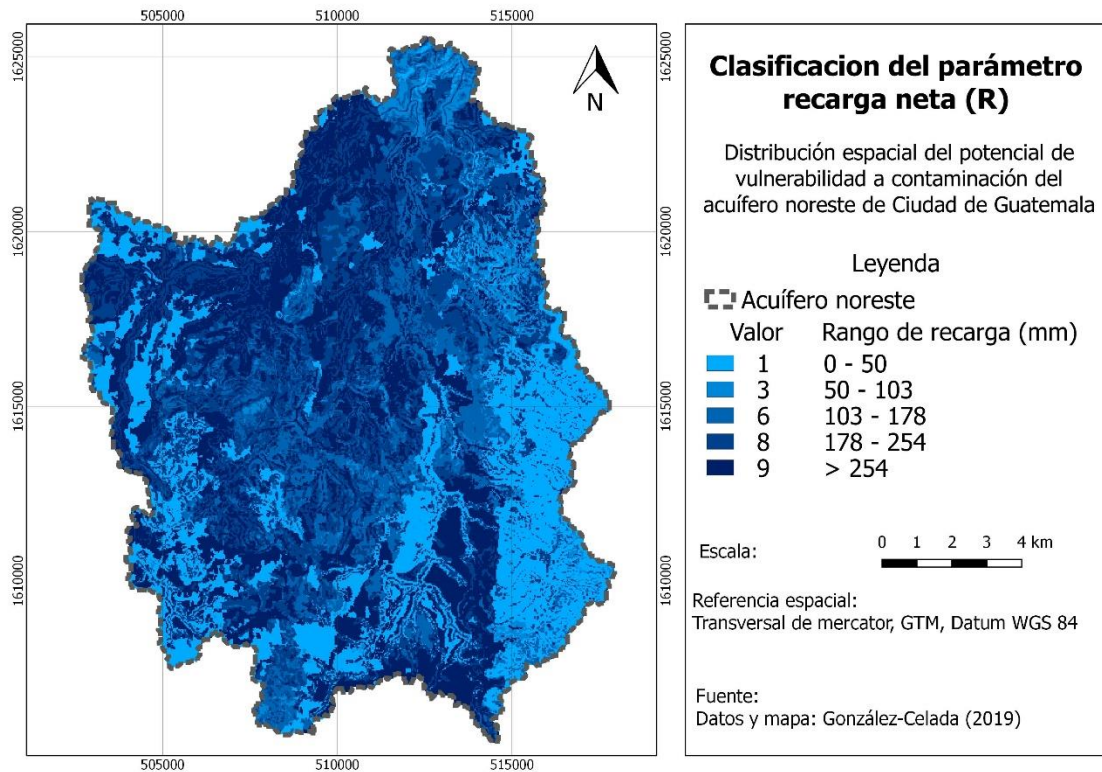
En esta misma dirección, Herrera Ibáñez (2012) estimó la recarga en la cuenca Los Ocotes en 4.180 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ , para lo cual usó un método local que integra geomorfología, cobertura vegetal y meteorología.

La recarga específica media multianual simulada es  $186,244 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , este valor se encuentra en la categoría de recarga alta (entre 150,000 y 300,000  $\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) dentro del límite del acuífero noreste, según el mapa de recarga hídrica metropolitana. No obstante, en dicho mapa la mayor superficie del acuífero en mención está representado por recarga media (entre 50,000 y 150,000  $\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy, 2012; G. Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy, 2013).

Por su parte, el coeficiente medio de recarga con respecto a la precipitación pluvial es 0.14. Ahora bien, este coeficiente es mayor en áreas de cobertura de

bosque (0.20), guamil-matorral (0.21), y café (0.17); por el contrario en agricultura, cultivos permanentes arbóreos, y pastos con valores 0.13, 0.11 y 0.15, respectivamente.

Después de lo anteriormente expuesto, se presenta espacialmente los valores de clasificación del parámetro recarga neta, considerado en el índice de sobreposición a contaminación DRASTIC (Fig. 6). Es evidente entonces que los valores de clasificación de mayor presencia en el acuífero noreste son aquellos iguales a 9, 8 y 1.



**Figura 6. Valores de clasificación para el parámetro recarga neta (R), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala**

### 3.3. Medio del acuífero

El medio del acuífero describe las características de este medio rocoso que es capaz de producir agua para diferentes usos. Es así que Aller *et al.* (1987), proporciona una clasificación de acuerdo al material del acuífero. A los efectos de este estudio, en el acuífero noreste de ciudad de Guatemala se presenta la clasificación de este parámetro del método DRASTIC, con base a información de estudios hidrogeológicos locales (Fig. 7). Donde el origen volcánico de este acuífero le brinda las características representativas (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016; Pérez, 2009).

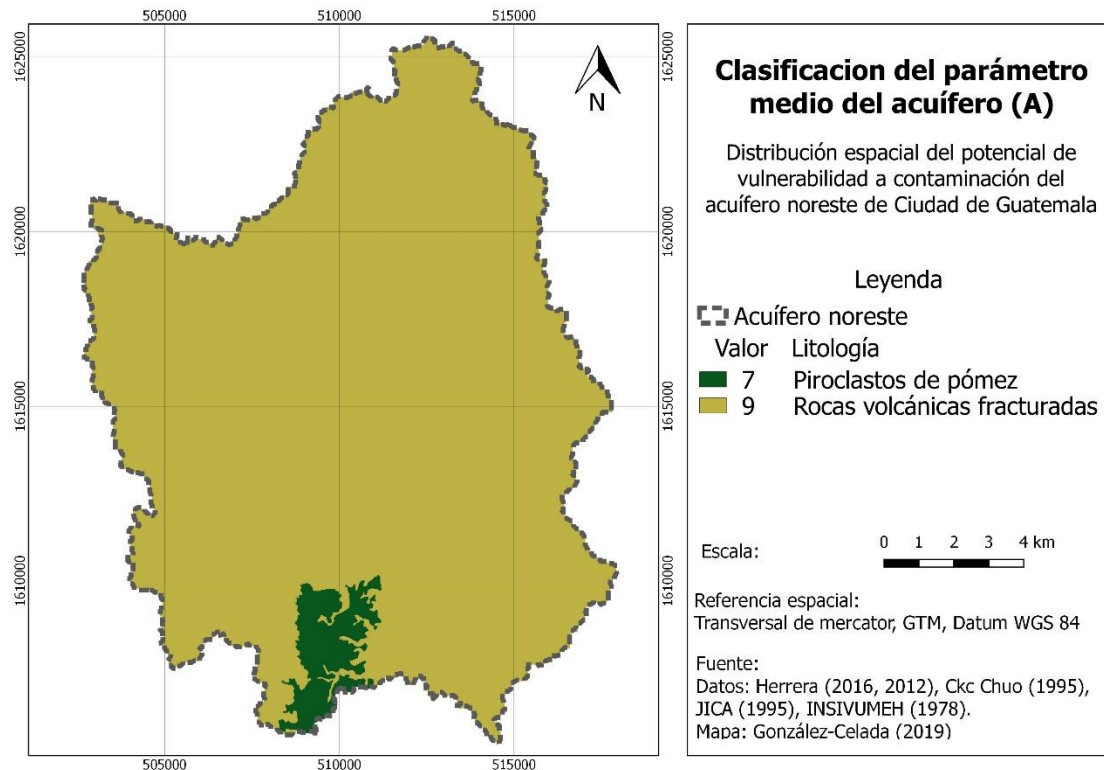


Figura 7. Valores de clasificación del parámetro medio del acuífero (A), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala

### 3.4. Medio del suelo

Este parámetro está posicionado en la zona vadosa y se caracteriza por su actividad biológica y por su impacto en la cantidad de agua que se percola y recarga los acuíferos. Es así como se relaciona con la habilidad para que los contaminantes se muevan verticalmente en esta zona del suelo (Aller *et al.*, 1987). En el acuífero noreste de ciudad Guatemala, las zonas de clasificación de mayor potencial a contaminación para este parámetro son aquellas en la cuenca baja del río Teocinte y lechos de ríos. Por su parte, las áreas de menor potencial están distribuidas en la zona media y alta de las cuencas hidrográficas, Los Ocotes y Teocinte (Fig. 8).

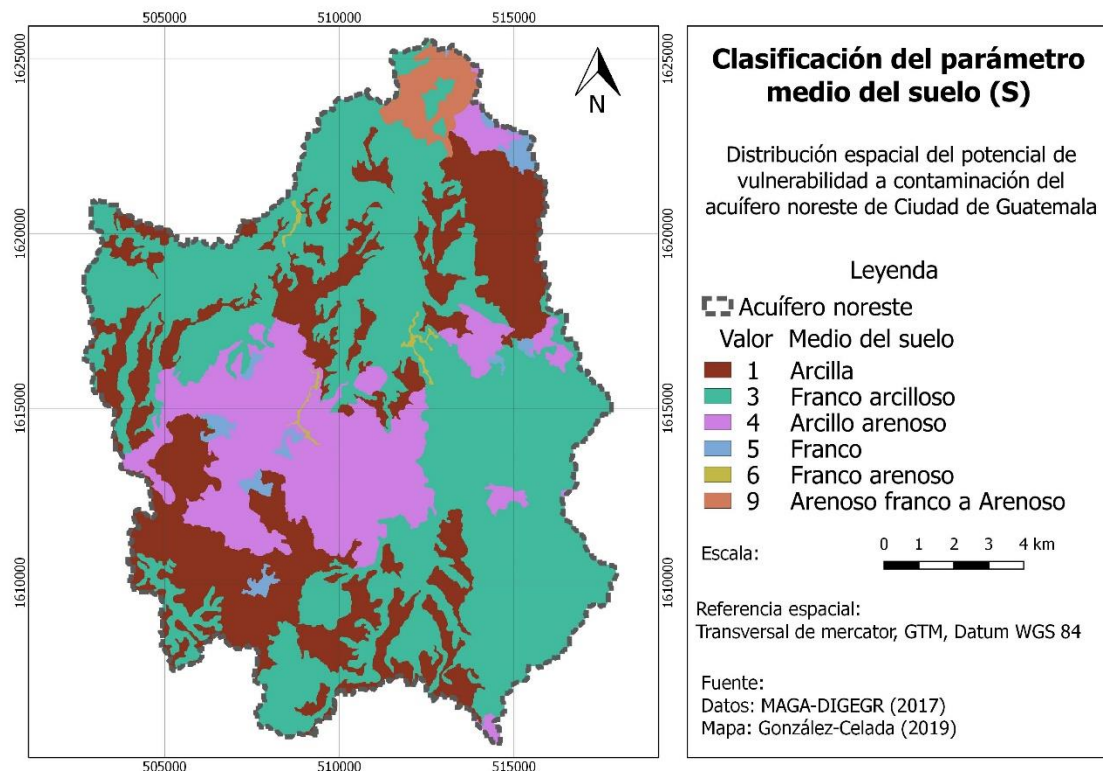


Figura 8. Valores de clasificación del parámetro medio del suelo (S), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala

### 3.5. Topografía

Este parámetro relaciona la facilidad de un contaminante para infiltrarse con la pendiente de la superficie de la tierra. Es así como, en pendientes inferiores a 3 %, se ofrece las condiciones favorables para que el contaminante permanezca sobre la superficie y pueda infiltrarse (Aller *et al.*, 1987); situación que en el acuífero noreste es poco frecuente (valor de clasificación 10). Por el contrario, en este acuífero la mayor superficie presenta pendientes superiores al 18 % (valor de clasificación 1) (Fig. 9). Ya que, en este territorio el relieve se caracteriza por la presencia de filas y vigas, lomas y terrazas (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo, 2017).

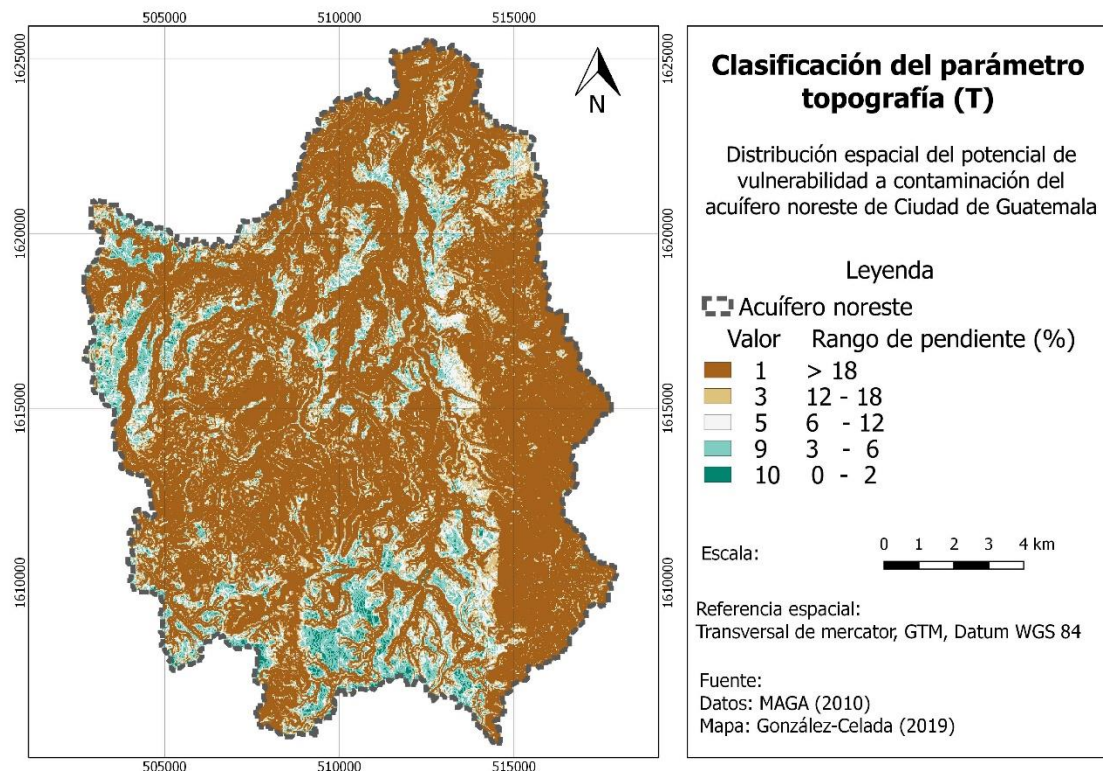


Figura 9. Valores de clasificación del parámetro topografía (T), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala

### 3.6. Impacto de la zona vadosa

Según Aller *et al.* (1987), el material de la zona vadosa determina el grado de atenuación de contaminantes, por abajo del medio del suelo (parámetro S) y por arriba de la tabla de agua (parámetro D). En este propósito, en el acuífero noreste de ciudad Guatemala, existe mayor potencial a contaminación en áreas con rocas fracturadas del terciario (valor 8). Por lo contrario en rocas intrusivas impermeables (valor 1) (Fig. 10).

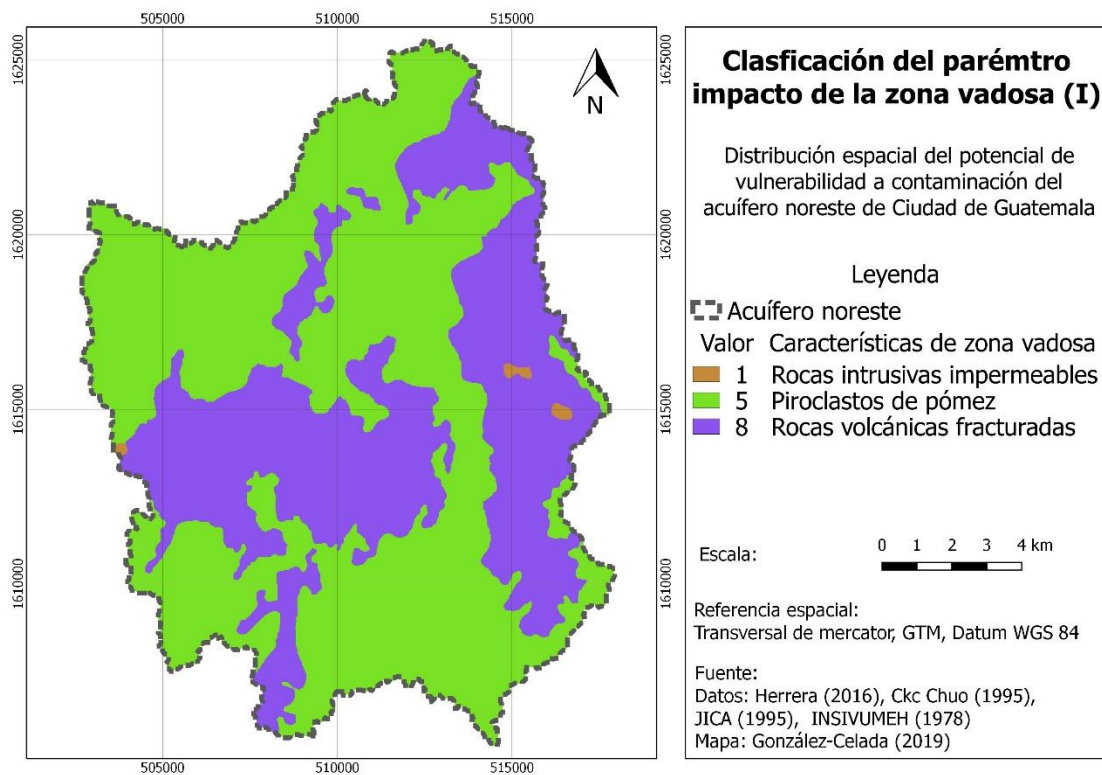


Figura 10. Valores de clasificación del parámetro impacto de la zona vadosa (I), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala



### 3.7. Conductividad hidráulica

En el acuífero noreste de la ciudad Guatemala la habilidad para transmitir agua está entre baja y media (Aller *et al.*, 1987; Herrera Ibáñez *et al.*, 2016). Asimismo, a pesar de presentarse en la mayor superficie de este acuífero un medio de rocas fracturadas del terciario, esta fracturación es poco abierta (Herrera Ibáñez *et al.*, 2016). Por otro lado, a pesar de encontrarse transmisividades altas en la cuenca media, dado el espesor saturado del acuífero, resulta en estas permeabilidades bajas a medias (Fig. 11).

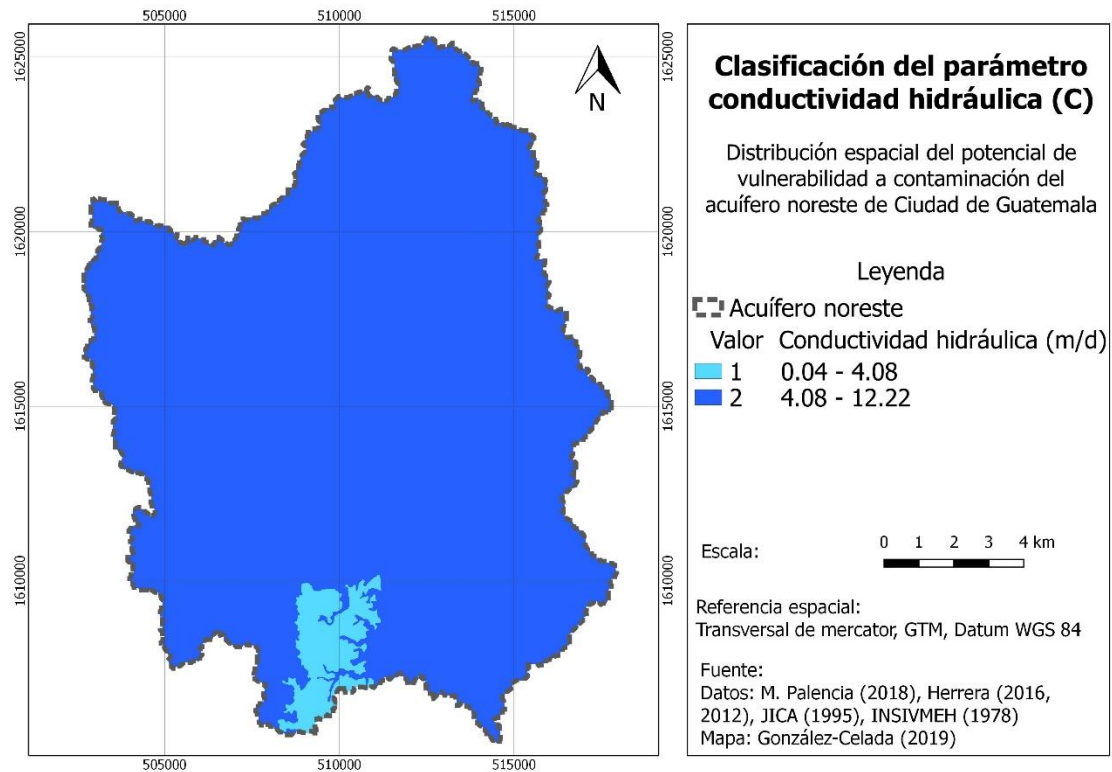


Figura 11. Valores de clasificación del parámetro conductividad hidráulica (C), del índice DRASTIC para el acuífero noreste de ciudad de Guatemala

#### 4. VULNERABILIDAD ESPACIAL A CONTAMINACIÓN

La distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero bajo estudio se presenta en la figura 12, la clasificación de ésta es con base al código de color nacional de los Estados Unidos, recomendado por Aller *et al.* (1987), y la clasificación de potencial de vulnerabilidad presentado por Musálem *et al.* (2015). Es así como, la clase de potencial de vulnerabilidad bajo es la de mayor frecuencia, la que a su vez representa el 56.09 % de la superficie del acuífero. Le siguen las clases de potencial a vulnerabilidad muy bajo con 22.77 %, mínimo con 13.50 %, y medio bajo representa el 7.62 %. Por otro lado, no se presentan las clases de potencial a vulnerabilidad alto y muy alto, y la clase máxima representa menos del 1 % (Tabla XIII).

Hallazgos similares son reportados por Herrera Ibáñez (2015) en la cuenca del río Los Ocotes, la cual conjunto a la cuenca del río Teocinte tienen correspondencia con el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, donde la clase de potencial de vulnerabilidad baja es la de mayor frecuencia (53 %), el autor usó el método GOD. Por su parte, Ramírez Mejía (2003), presenta que la vulnerabilidad moderada es la más frecuente en los sectores del acuífero noreste evaluados con el índice DRASTIC.

Es importante mencionar que los datos de cada parámetro considerado para la estimación del potencial a vulnerabilidad en este acuífero son limitados; donde sobresale el poco detalle y distribución espacial de estos, lo que a su vez contribuye a errores en el proceso de estimación de la condición estudiada. Esta es la razón por la cual Baalousha (2010), afirma que la distribución espacial de

sitios de monitoreo de agua subterránea es el mayor reto al que se enfrenta un profesional hidrogeólogo.

En relación a los datos, Lobo Ferreira y Oliveira (2004), indica que es más acertado mapas de vulnerabilidad específica; pero generalmente habrán pocos datos para realizar estos mapeos, por lo que se deben emplear métodos simples de mapeo con el mejor uso de los datos. Desde este punto de vista, el análisis de sensibilidad presentado más adelante contribuye un primer paso en la simplificación o mejora del método DRASTIC (Gheisari, 2017; Su, Yuan, Xu, y Du, 2015). Por otro lado, el potencial a vulnerabilidad de este acuífero constituye una herramienta de planificación ambiental útil para tomadores de decisión (Gogu y Dassargues, 2000; Vignola, 2005).

**Tabla XIII. Distribución porcentual del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, aplicando el código de color nacional de los Estados Unidos al método DRASTIC.**

<b>Índice DRASTIC</b>	<b>Potencial de vulnerabilidad</b>	<b>Porcentaje</b>
< 79	Mínimo	13.503
80 - 99	Muy bajo	22.773
100 - 119	Bajo	56.090
120 - 139	Medio-bajo	7.619
140 - 159	Medio-alto	0.013
160 - 179	Alto	0.000
180 - 199	Muy alto	0.000
> 200	Máximo	0.001

Fuente: elaboración propia con base a datos del presente estudio, Aller *et al.* (1987) y Musálem *et al.* (2015)

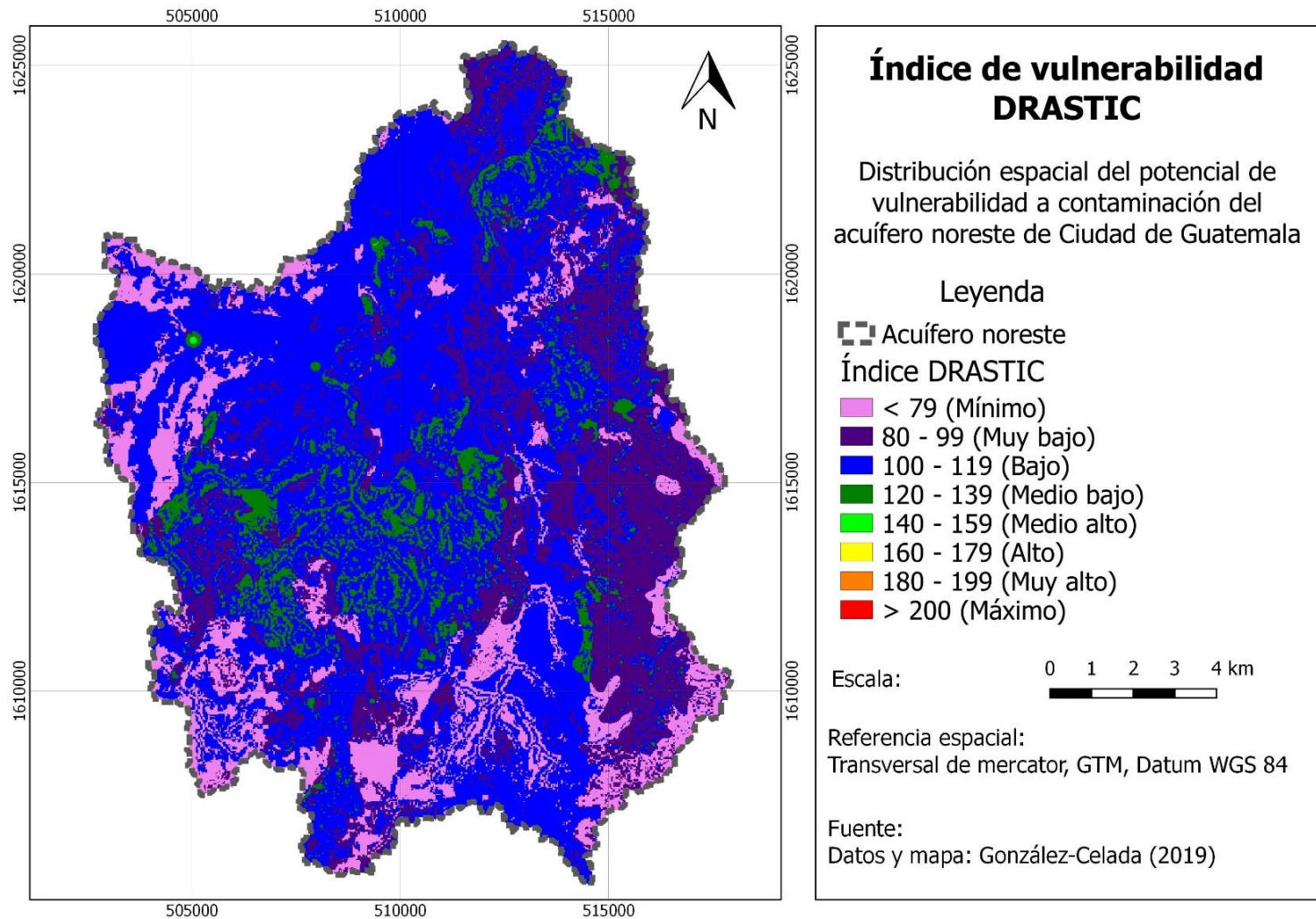


Figura 12. Distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala

Mientras que aplicando un sistema de clasificación local, es decir, con base a los valores obtenidos del índice DRASTIC para el acuífero noreste, la mayor frecuencia de potencial a vulnerabilidad es medio (66 %). Para esta clasificación el rango de valores se categorizó en tres clases, alta, media y baja (Fig. 13, Tabla XIV).

Es importante mencionar que comparativamente con el código de color nacional de los Estado Unidos, en la clasificación local la clase de potencial de vulnerabilidad medio corresponde en su mayoría a la clase bajo del primer código (Fig. 12 y 13).p

**Tabla XIV. Distribución porcentual del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, con base a propuesta de clasificación local.**

<b>Rango índice DRASTIC</b>	<b>Potencial de vulnerabilidad</b>	<b>Porcentaje</b>
52 -83	Bajo	15.0
83 -114	Medio	66.0
114 -146	Alto	19.0

Fuente: elaboración propia

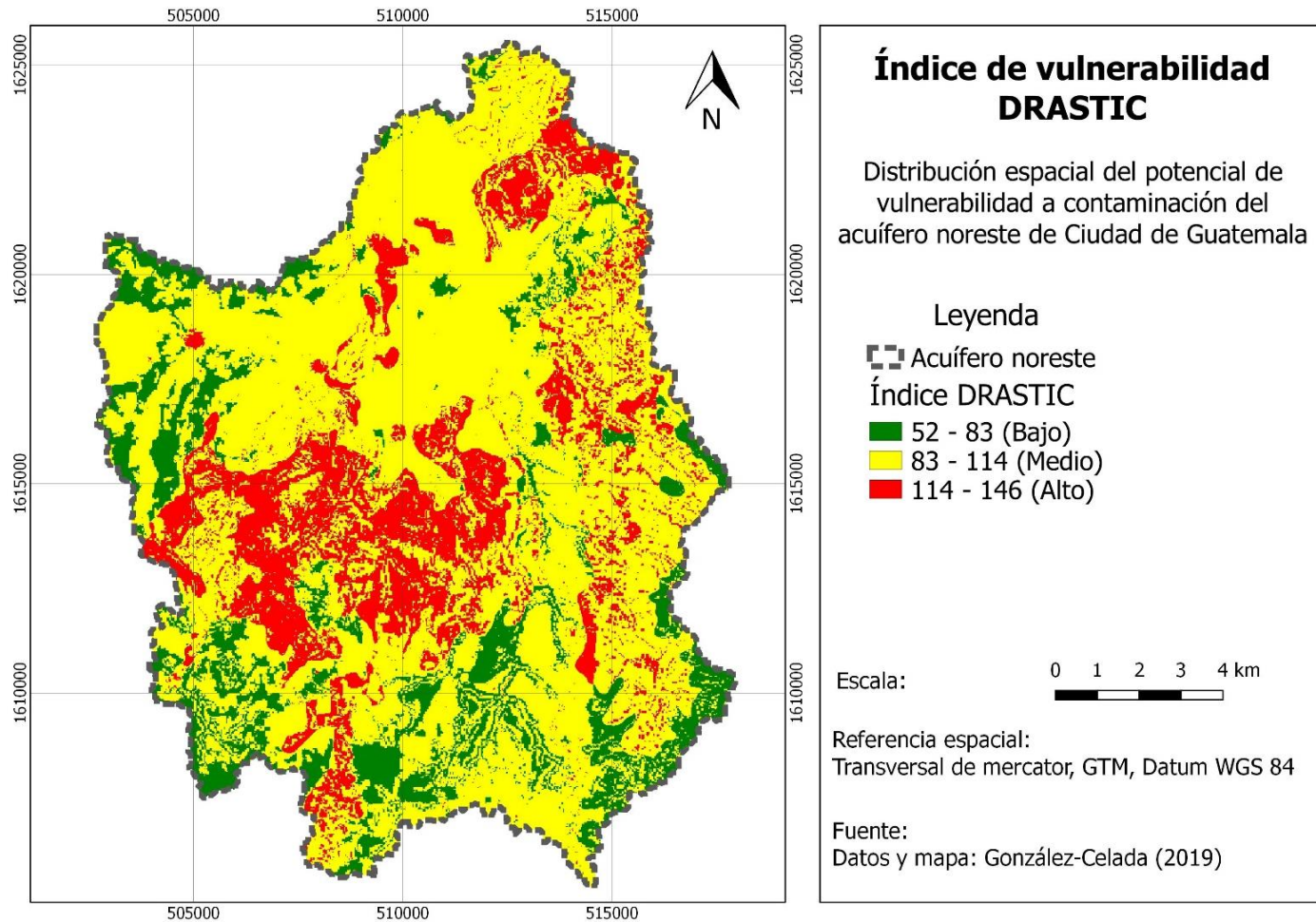


Figura 13. Distribución espacial del potencial de vulnerabilidad a contaminación del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, aplicando clasificación con base al rango de valores numéricos del índice DRASTIC para este acuífero.



## **5. PRIORIZACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD POR INFLUENCIA ANTRÓPICA**

De acuerdo con el uso/cobertura de la tierra como parámetro de influencia de contaminación por actividades antrópicas, se tiene que en el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala las zonas de prioridad alta están localizadas en una franja que dispersa que se extiende desde el suroeste hasta el noreste, y tienen correspondencia geográfica con el uso/cobertura agricultura anual; este mismo patrón se presenta para los tres criterios de clasificación de influencia del uso/cobertura en el incremento de la contaminación (Figuras 14, 15 y 16).

En las tres capas o mapas producidos de priorización, se tiene que la clase de prioridad alta espacialmente corresponde en su totalidad al uso de agricultura anual. De forma similar para la clase de prioridad media, está compuesta por los usos agricultura anual, guamil, pastos y urbano, principalmente. Ahora bien, es de prioridad baja las áreas de uso de bosque (Figuras 14, 15 y 16).

La aplicación de priorizar áreas de mayor vulnerabilidad por influencia antrópica usando el uso/cobertura de la tierra ayuda a comprender de mejor forma los hallazgos del índice DRASTIC (Ribeiro, 2005). Ya que tal índice únicamente expresa la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, y tal como indica Lobo Ferreira y Oliveira (2004), éstas características intrínsecas son estáticas y están fuera del control antrópico. Esta priorización a su vez es útil en planificación ambiental del monitoreo de la calidad de pozos, y establecer validaciones futuras de estos hallazgos. Es así como esta priorización contribuye a la selección óptima de sitios de monitoreo de agua subterránea en este acuífero; esta selección se puede mejorar con técnicas de geoestadística (Baalousha, 2010).



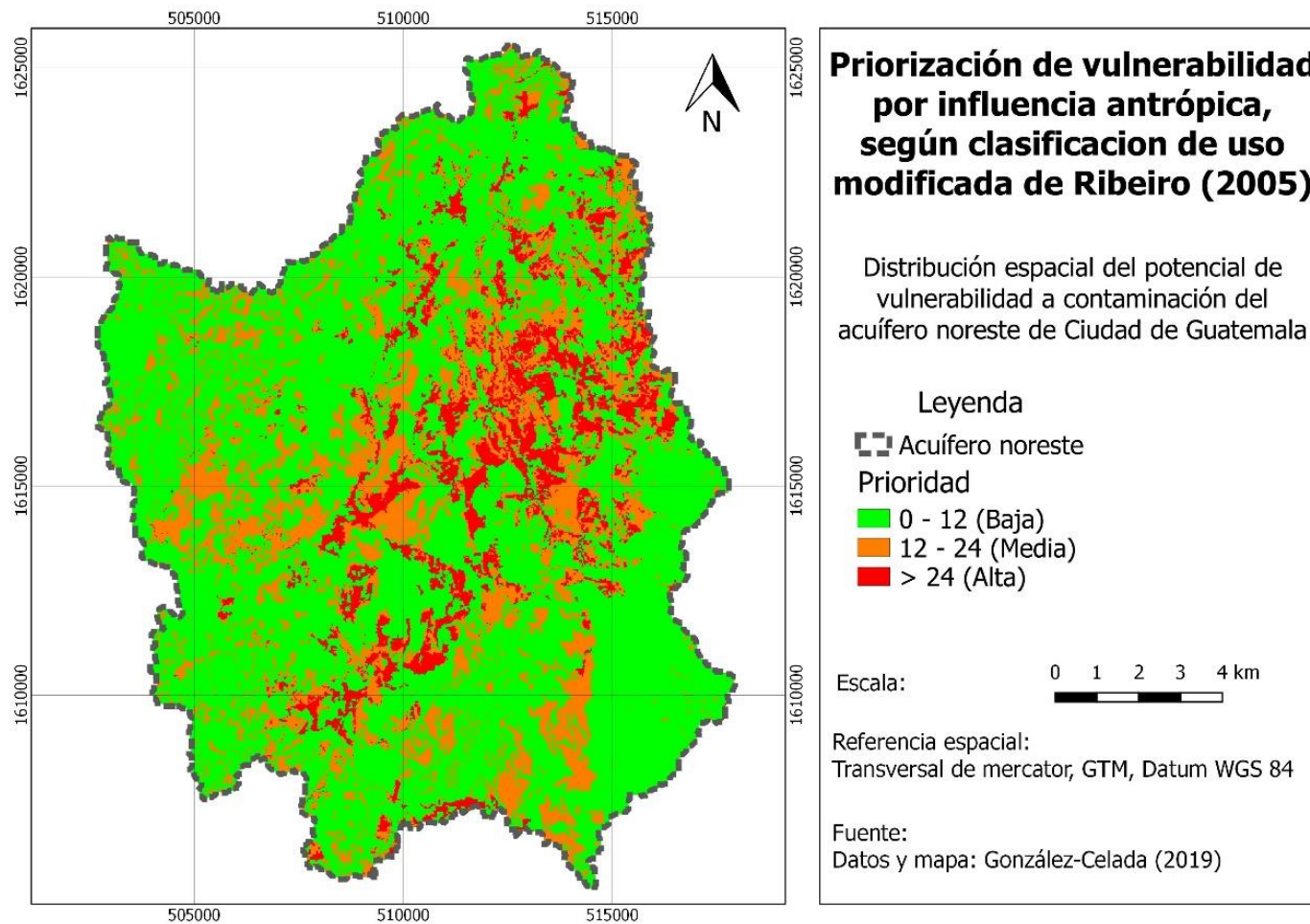


Figura 14. **Priorización de la vulnerabilidad potencial a contaminación según clasificación del uso de la tierra modificada de Ribeiro (2005)**

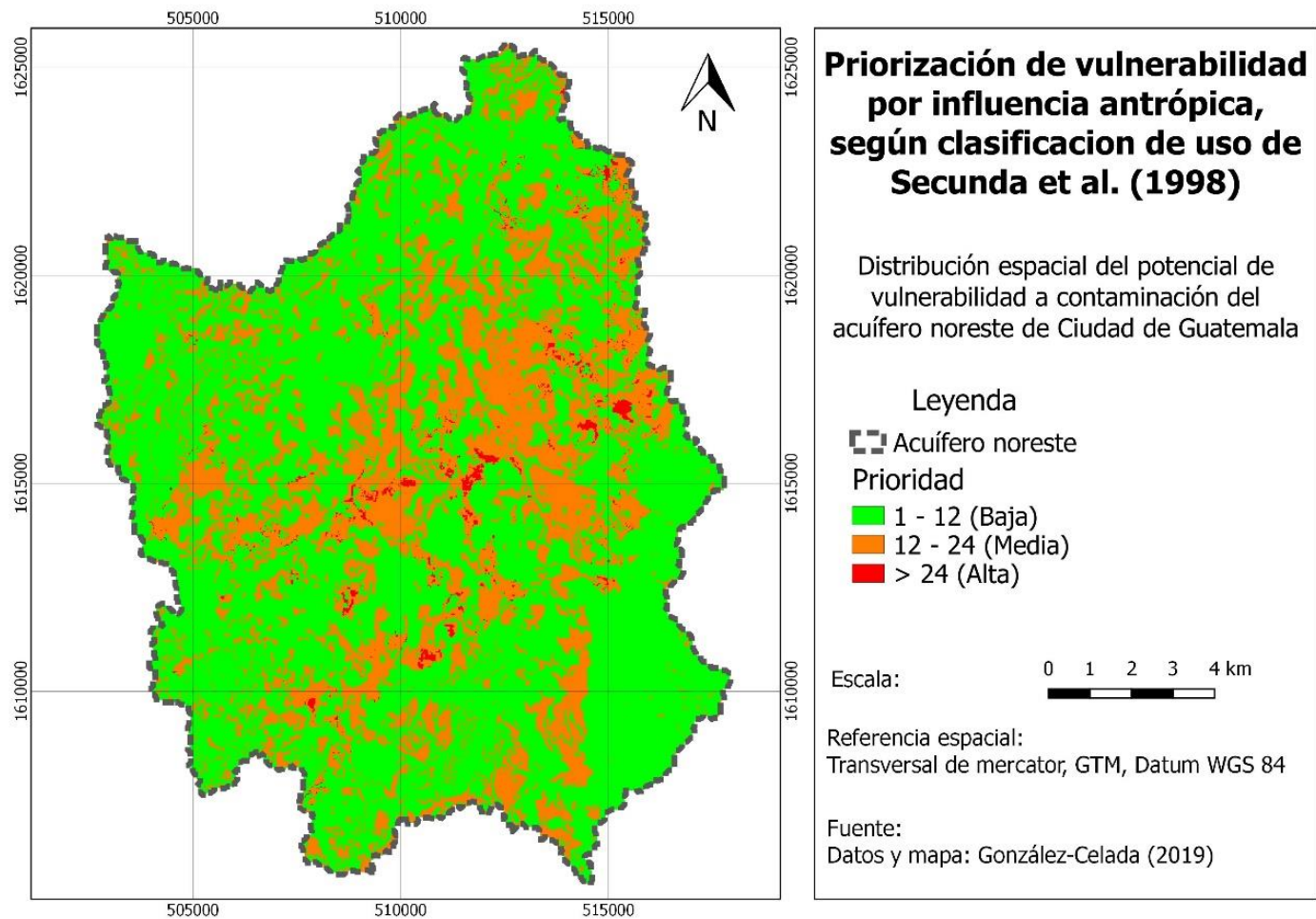


Figura 15. Priorización de la vulnerabilidad potencial a contaminación según de clasificación de uso de la tierra de Secunda et al. (1998)

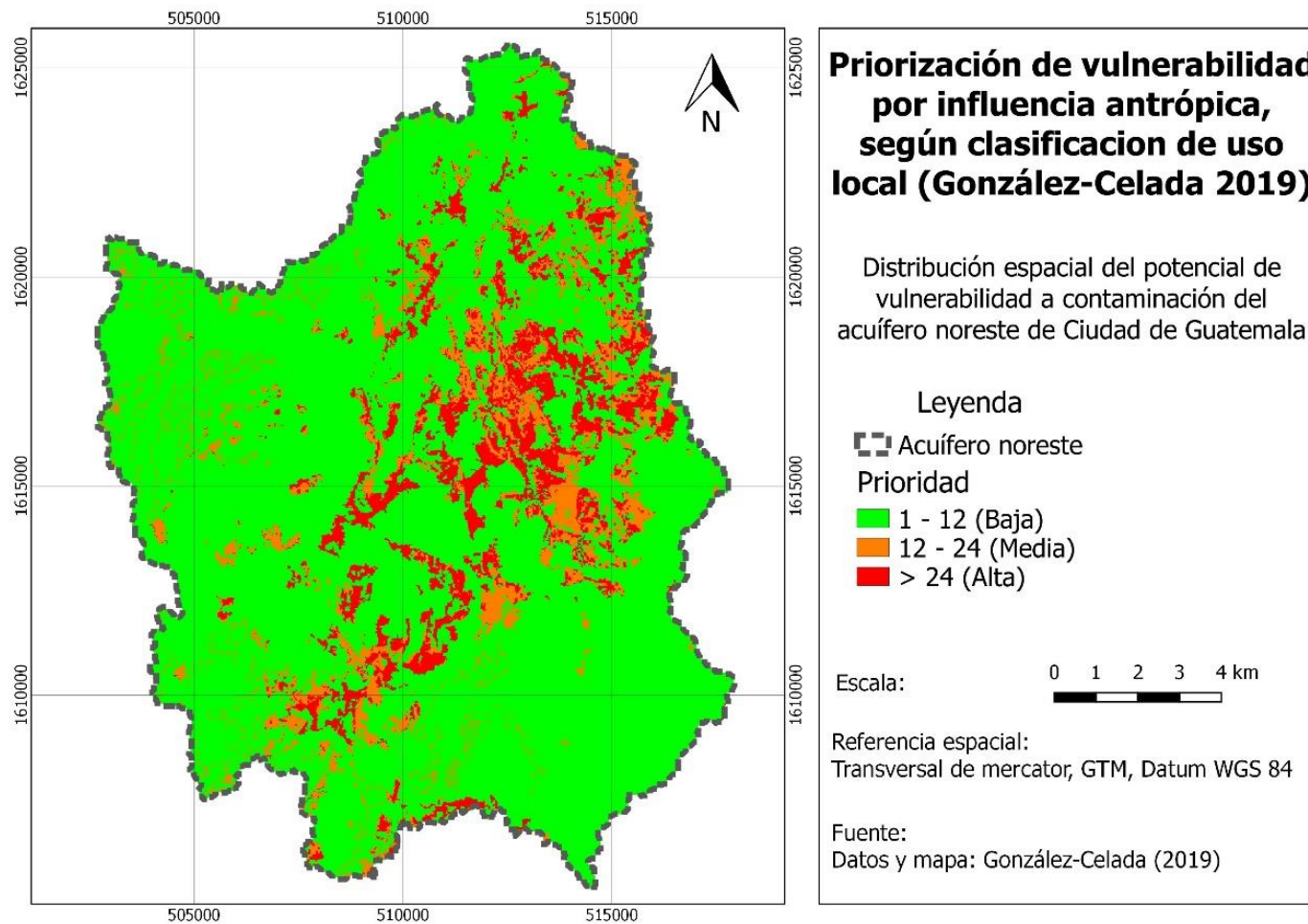


Figura 16. Priorización de la vulnerabilidad a contaminación según propuesta local de uso de la tierra

## 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DEL MÉTODO DRASTIC

Para las condiciones del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, el parámetro del índice DRASTIC de mayor impacto o influencia en el potencial de vulnerabilidad a contaminación es el impacto de la zona vadosa (I), seguido del medio del acuífero (A) y recarga neta (R), donde el peso promedio efectivo es  $30.8 \% \pm 7.16$ ,  $27.1 \% \pm 4.40$ , y  $23.0 \% \pm 11.18$ , respectivamente. Mientras que el resto de los parámetros presentan un impacto bajo ( $< 6.0 \%$ ) en el potencial de vulnerabilidad (Tabla XIV).

En el caso de la profundidad del agua (D), teóricamente Aller *et al.* (1987) le asigna el mayor peso, al igual que el impacto de la zona vadosa (I) (21.7 %). Aunque, localmente se evidencia que el parámetro profundidad del agua no tiene la influencia que plantea el autor en mención, debido a que en el acuífero bajo estudio la profundidad del agua es superior a los 30.5 m (Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala, 2019; Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy, 2012); umbral de profundidad que el método DRASTIC fija para el mínimo valor de clasificación. Así pues, en forma general se tiene que este parámetro no expresa variabilidad espacial, condición que se refleja en su impacto en el potencial de vulnerabilidad, es por lo que su peso efectivo promedio es igual a  $5.1 \% \pm 1.19$ , mucho menor al 21.7 % teórico (Tabla XIV, fig. 16).

De la misma manera ocurre con los parámetros topografía (T), medio del suelo (S), y conductividad hidráulica (C); quienes presentan baja distribución espacial,

lo cual se ve reflejado en la mínima influencia en el potencial de vulnerabilidad (peso efectivo promedio).

El parámetro impacto de la zona vadosa, localmente, presentó un impacto en el potencial a vulnerabilidad mayor en comparación al teórico (21.7 %); ya que su peso efectivo es  $30.8 \% \pm 7.16$ . Esto se puede explicar debido a que los factores que dominan la vulnerabilidad de la zona vadosa son múltiples y se relacionan con los estratos litológicos de esta zona (Li *et al.*, 2017); por lo que la existencia de rocas fracturadas en este acuífero es más significativo en el incremento del potencial de vulnerabilidad a contaminación. De manera semejante ocurre con el medio del acuífero (Tabla XV, fig. 17).

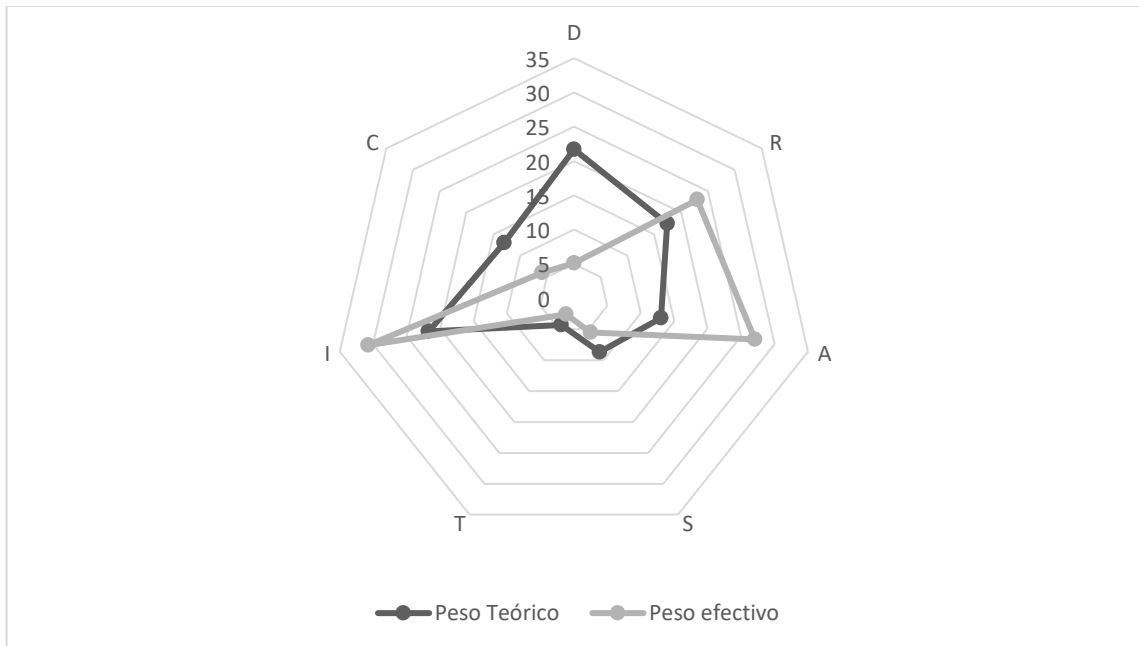
Por su parte, la recarga neta, incrementó levemente su impacto en el potencial de vulnerabilidad; esto podría deberse a que la tasas de recarga hídrica en el acuífero es alta ( $186 \text{ mm año}^{-1}$ ) (Gheisari, 2017).

**Tabla XV. Estadística del análisis de sensibilidad de un solo parámetro, y los pesos teóricos del índice DRASTIC, para el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala**

Parámetro	Peso teórico	Peso teórico (%)	Peso efectivo (%)			
			Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
D	5	21.7	5.1	1.19	3.55	94.99
R	4	17.4	23.0	11.18	0.3	43.9
A	3	13.0	27.1	4.40	2.02	51.92
S	2	8.7	5.5	2.81	0.15	20.93
T	1	4.3	2.6	2.80	0.22	15.52
I	5	21.7	30.8	7.16	1.87	52.63
C	3	13.0	6.0	1.06	0.45	11.54

Fuente: elaboración propia

Resulta oportuno mencionar que la distribución espacial de datos para este estudio es limitada y no se tiene una visión total del medio estudiado; con lo cual, no se puede inferir si la información utilizada es redundante. Dadas las condiciones que anteceden, incrementar los sitios de monitoreo considerando los hallazgos de la presente investigación incrementará los elementos de análisis del territorio.



**Figura 17. Tendencia de la ponderación efectiva con respecto a la teórica de los siete parámetros hidrogeológicos del índice DRATIC en el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala**



## CONCLUSIONES

1. En el acuífero noreste de la ciudad de Guatemala, la clase de vulnerabilidad baja, según el código de color de los Estados Unidos, y la clase de vulnerabilidad media para la propuesta de clasificación local son las predominante; con 56 % y 66 % de la superficie, respectivamente. En gran medida esto se relaciona con que los parámetros profundidad del agua (D), medio del suelo (S), topografía (T), y conductividad hidráulica (C), presentan un bajo impacto o influencia sobre el índice de vulnerabilidad DRASTIC, con base al análisis de sensibilidad de un solo parámetro.
2. De los siete parámetros del índice DRASTIC, sólo la recarga neta (R) fue estimada por modelación hidrológica con la herramienta SWAT, siendo la media anual multianual de 186 mm año<sup>-1</sup>. La calibración del caudal observado mostró ajuste no satisfactorio, según los estadísticos de bondad de ajuste KGE y Nash-Sutcliffe, -0.29 y -3.19, respectivamente. Para el período de simulación, los datos de caudal observado son limitados en tiempo y espacio. Con estas limitantes la recarga hídrica estimada es comparable con estimaciones efectuadas por otros autores.
3. Usando el uso de la tierra como parámetro de influencia de contaminación antrópica del acuífero, y aplicando tres valores de clasificación del uso de la tierra, según esta influencia, se prevé que el mayor porcentaje del acuífero es de baja prioridad. Evidenciándose que las zonas de alta y media prioridad están ubicadas en zonas de uso de la tierra agricultura



anual, matorrales, pastizales y urbano; mientras que las de baja prioridad en el uso bosque.

4. Localmente, de acuerdo con el análisis de sensibilidad de un solo parámetro, los parámetros de mayor impacto o influencia en el mapa o capa de vulnerabilidad intrínseca por el método DRASTIC son el impacto de la zona vadosa (I), medio del acuífero (A), y recarga hídrica (R); con pesos efectivos promedio de 30.8 %, 27.1 % y 23.0 %, respectivamente. Pesos que a su vez son mayores que los pesos teóricos establecidos por el método DRASTIC.

## RECOMENDACIONES

1. Los parámetros profundidad del agua (D), medio del suelo (S), topografía (T), y conductividad hidráulica (C), por su bajo impacto o efecto en el mapa de potencial de vulnerabilidad a contaminación, debido a sus pesos efectivos por abajo del 6 %, se propone un modelo DRASTIC modificado. Dicha modificación consiste en la eliminación de los parámetros anteriores, siempre y cuando persista la baja o pobre distribución espacial y temporal de datos que determinan cada parámetro de este método. Los hallazgos de este modelo DRASTIC modificado deberán compararse con el presente estudio.
2. Realizar un estudio sobre el método de vulnerabilidad por sobreposición de capas más adecuado a las condiciones hidrogeológicas locales; ya que la poca variabilidad espacial y temporal de los datos constituyen limitaciones.
3. Calibrar y validar los hallazgos encontrados en el presente estudio con variables observadas como podría ser el nitrógeno; universalmente se utiliza la concentración de nitratos.
4. Con base a la priorización del potencial de vulnerabilidad realizar monitoreo de calidad de agua subterránea, con el fin de validar los hallazgos obtenidos en el presente estudio.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*.
- Abbaspour, K., Johnson, C., & Van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., . . . Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2), 413-430.
- Agencia de Cooperación Internacional del Japón. (1995). *Estudio sobre el desarrollo de las aguas subterráneas en el altiplano central de la República de Guatemala*. Tokio: Autor.
- Alaerts, G. J., & Khouri, N. (2004). Arsenic contamination of groundwater: Mitigation strategies and policies. *Hydrogeology Journal*, 12(1), 103-114.
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. Oklahoma: US Environmental Protection Agency (p. 622).
- Anderson, M., & McDonnell, J. J. (2005). *Encyclopedia of hydrological science*: John Wiley & Sons Ltd.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., . . . Van Liew, M. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

- Baalousha, H. (2010). Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural water management*, 97(2), 240-246.
- Ballestero, M., Reyes, V., & Astorga, Y. (2007). Groundwater in Central America: its importance, development and use, with particular reference to its role in irrigated agriculture. Giordano, M. & Villholth, KG, The agricultural groundwater revolution. Opportunities and threads to development. International water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka. (pp. 100-128).
- Barrocu, G. (2014). Groundwater hydrology: saturation zone. En S. Eslamian (Ed.), (pp. 221-249).
- Basterrechea, M. (2012). Estado del agua en Guatemala. En M. B. García, J. Laclette, P. Zúñiga, & E. L. Almaraz (Eds.), Diagnóstico del agua en las Américas. (pp. 280-307).
- Bernal Reyes, J. P. (2010). *Estudio de vulnerabilidad sísmica, para el sistema de abastecimiento de agua, provisto por la planta Santa Luisa, en la Ciudad de Guatemala*. (Tesis), Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. *Universidad Autónoma Metropolitana, México*.
- Brindha, K., & Elango, L. (2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of Hydrology*, 524, 597-613.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: an introduction* (Vol. 61): Wiley Online Library.
- Chacón, A. (2011). *Sistematización de mecanismos de compensación, certificación y crédito en Centro América y Republica Dominicana*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/270760739 Sistematizacion de Mecanismos de Compensacion Certificacion y Credito en Centro America y Republica Dominicana para la proteccion y conservacion de bosques](https://www.researchgate.net/publication/270760739_Sistematizacion_de_Mecanismos_de_Compensacion_Certificacion_y_Credito_en_Centro_America_y_Republica_Dominicana_para_la_proteccion_y_conservacion_de_bosques)
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.

- Ckc Chuo Kaihatsu Corporation. (1995). *Estudio Hidrogeológico en el valle de la Ciudad de Guatemala, Proyecto Emergencia I*. Guatemala: Autor.
- Coló López, G. R. (2014). *Estudio de los niveles freáticos del área norte y este de la ciudad capital*. (Tesis), Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. (2000). *Evaluación de Recursos de Agua de Guatemala*. Recuperado de <http://www.sam.usace.army.mil/Portals/46/docs/military/engineering/docs/WRA/Guatemala/Guatemala%20WRA%20Spanish.pdf>
- Farrocu, G. (2014). Groundwater Hydrology: Saturation Zone. En S. Eslamian (Ed.), (pp. 221-249).
- Fetter, C. W. (2000). *Applied hydrogeology*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Fitts, C. R. (2012). *Groundwater science* (2 ed.). Maine, United States of America: Elsevier.
- Focazio, M. J., Reilly, T. E., Rupert, M. G., & Helsel, D. R. (2002). *Assessing ground-water vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers*. United States: US Geological Survey Circular 1224.
- Fuka, D. R., Walter, M. T., MacAlister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological processes*, 28(22), 5613-5623.
- Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala. (2019). *Análisis piezométrico de pozos de agua para los municipios de la Mancomunidad Gran Ciudad del Sur: Amatitlán, Mixco, San Miguel Petapa, Santa Catarina Pinula, Villa canales y Villa Nueva, Guatemala*. Guatemala: Autor.
- Gheisari, N. (2017). *Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based modified DRASTIC model in agricultural areas*. Université d'Ottawa/University of Ottawa.
- Giordano, M. (2009). Global groundwater? Issues and solutions. *Annual review of Environment and Resources*, 34, 153-178.

- Girón y Girón, D. (2011). *Evaluación y mapeo de la calidad de agua y nivel freático en pozos artesanales para abastecimiento humano y su posible relación con la red hidrológica en el casco urbano de la ciudad de Chiquimula*. (Tesis), Centro Universitario de Oriente, Universidad de San Carlos de Guatemala, Chiquimula, Guatemala.
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9(2), 161.
- Global Water Partnership, & International Network of Basin Organizations. (2009). *A Handbook for Integrated Water Resources Management in Basins*.
- Global Water Partnership Technical Advisory Committee. (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos (Tac background papers No. 4)*. Estocolmo, SE: Autor.
- Gogu, R., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39(6), 549-559.
- Griffiths, J. (2014). Catchment water yield. En S. Eslamian (Ed.), (pp. 1-21).
- Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra (Cartografía). (2014). Mapa de bosques y uso de la tierra 2012.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1), 80-91.
- Gurdak, J. J. (2014). Groundwater vulnerability. En S. Eslamian (Ed.), *Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Management*. (pp. 145-162).
- Guzmán Sáenz, N. (2013). *Evaluación del consumo de agua potable en la Ciudad de Guatemala en los años dos mil ocho al dos mil diez (2008-2010) y su relación con la escasez de agua y el cambio climático (Proyecto FODECYT No. 2011-30)*. Recuperado de <http://glifos.concyt.gob.gt/library/index.php?title=4837&lang=en&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@autor=GUZMAN%20SAENZ,%20NICOLAS%20DE%20JESUS%20@mode=&recnum=2>
- Han, D. (2010). *Concise hydrology*. Dawei Han & Ventus Publishing ApS.

- Harter, T. (2003). *Basic concepts of groundwater hydrology*. UCANR Publications.
- Heath, R. C. (1983). *Basic ground-water hydrology* (Vol. 2220): US Geological Survey.
- Herrera Ibáñez, I. R. (2012). *Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca del río Los Ocotes, para determinar las áreas principales de recarga hídrica e identificación de las áreas vulnerables a deslizamientos e inundaciones para proponer alternativas de prevención de la parte noreste de la ciudad de Guatemala (Proyecto FODECYT No. 2009-035)*. Recuperado de <http://glifos.concyt.gob.gt/library/index.php?title=4117&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@encabezamiento=MATEMATICA%20PURA%20@mode=&recnum=495>
- Herrera Ibáñez, I. R. (2015). Vulnerabilidad del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. *Tikalía*, 33(2), 39-55.
- Herrera Ibáñez, I. R., Manzo Barrientos, D., & Hernández, E. J. (2016). *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala (Proyecto DIGI con partida presupuestaria 4.8.63.2.69)*. Recuperado de <http://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2016-05.pdf>
- Hiscock, K. M. (2014). *Hydrogeology: principles and practice* (2 ed ed.): John Wiley & Sons.
- Hudak, P. F. (2000). *Principles of hydrogeology* (2 ed.). Florida, USA: CRC Press.
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, & The Nature Conservancy. (2012). *Elementos de análisis para caracterizar el estado y estimar el consumo de las aguas subterráneas en el área metropolitana de Guatemala*. Guatemala: Autor.
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente Universidad Rafael Landívar, & The Nature Conservancy. (2012). *Disponibilidad de agua en la región metropolitana de la Ciudad de Guatemala: bases fundamentales para la gestión hídrica con visión a largo plazo (Serie para la educación y el cuidado de la vida 3)*. Guatemala: Autor.
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente Universidad Rafael Landívar, G., & The Nature Conservancy, G. (2013). *Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala*. Serie para la educación y el cuidado de la vida 3, (p. 124). Recuperado de



[https://www.plazapublica.com.gt/sites/default/files/Bases\\_tecnicas\\_gestion\\_del\\_agua.pdf](https://www.plazapublica.com.gt/sites/default/files/Bases_tecnicas_gestion_del_agua.pdf)

- Instituto Geográfico Nacional. (1973). *Reconocimiento hidrogeológico del valle de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras públicas e Instituto Geográfico Nacional.
- Instituto Nacional de Bosques, & Consejo Nacional de Áreas Protegidas (Cartografía). (2015). Mapa Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque, 2012
- Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. (2018). *Estación INSIVUMEH central: serie histórica (1970 a 2017) de variables climáticas* [Base de datos en formato Microsoft Excel].
- Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. (1978). *Informe final del estudio de aguas subterráneas en el valle de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala: Autor.
- Iqbal, J., Gorai, A., Tirkey, P., & Pathak, G. (2012). Approaches to groundwater vulnerability to pollution: a literature review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 9(1), 105-115.
- Japan International Cooperation Agency. (1986). *Feasibility study on the ground water development project (for emergency 1) volume 2: Appendix 1*. Guatemala: Autor.
- Laino, R. M., Jiménez, F., Páez, G., Casanoves, F., & Velásquez, S. (2006). Manejo del recurso hídrico y vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Guaraní en la cuenca del arroyo Capiibary, Paraguay. *Recursos Naturales y Ambiente*(48).
- Lane, L. J. (1983). Chapter 19: Transmission Losses. En *Natural Resources Conservation Service (Ed.), National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology*. (pp. 19-11-19-17).
- Li, J., Xi, B., Cai, W., Yang, Y., Jia, Y., Li, X., . . . Yang, J. (2017). Identification of dominating factors affecting vadose zone vulnerability by a simulation method. *Scientific reports*, 7, 45955.
- Lobo Ferreira, J., & Oliveira, M. M. (2004). Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica internacional*, 43(4), 541-550.
- Lodwick, W. A., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems:

- suitability analysis. *International Journal of Geographical Information System*, 4(4), 413-428.
- López Bautista, D. E. (2005). *Hidrogeología de la subcuenca del río Platanitos, Guatemala*. (Tesis), Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Lotter, J. T., Lacey, S. E., Lopez, R., Socoy Set, G., Khodadoust, A. P., & Erdal, S. (2014). Groundwater arsenic in Chimaltenango, Guatemala. *Journal of water and health*, 12(3), 533-542.
- Lundin, L., Bergström, S., Eriksson, E., & Seibert, J. (2000). Hydrological models and modelling.
- Maidment, D. (1992). Hydrology. En D. Maidment (Ed.), (pp. 1.1-1.15).
- Manzo Barrientos, D. (2008). *Reconocimiento hidrogeológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala*. (Tesis), Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala Guatemala.
- Martínez Izaguirre, R. (2017). *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del valle del Sébaco ante la contaminación y sobreexplotación y propuesta de un Plan de Gestión del Recurso Hídrico*. (Tesis), Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Guatemala.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design* (2 ed.). United States, : Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Megdal, S. B. (2018). Invisible water: the importance of good groundwater governance and management. *npj Clean Water*, 1(1), 15.
- Meinzer, O. E. (1923). *Outline of ground-water hydrology, with definitions*. Washington, USA: United States Government Printing Office.
- Merchant, J. W. (1994). GIS-based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 60, 1117-1117.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (Cartografía). (2010). Modelo de Elevación Digital escala 1:50,000
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo. (2017). *Estudio*

*semidetallado de suelos del Departamento de Guatemala, Guatemala.* (Vol. I y II). Guatemala: Autor.

- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección General de Servicios Agrícolas; Dirección Técnica de Riego y Avenamiento. (1991). *Plan maestro de riego y drenaje: Hidrogeología, disponibilidad de agua subterránea (Documento No. 2)*. Guatemala: Autor.
- Mockus, V. (1972). Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall. Section 4 Hydrology, National Engineering Handbook. (pp. 10A11-10A51).
- Morales Samayoa, J. I. (2013). Descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero Metropolitano en el valle de Guatemala. *8*(1), 49-54.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885-900.
- Mosley, P. M., & McKerchar, A. I. (1992). Streamflow. En D. Maidment (Ed.), (pp. 8.1-8.39).
- Muhammad, A. M., Zhonghua, T., Dawood, A. S., & Earl, B. (2015). Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofísica internacional*, *54*(1), 67-81.
- Municipalidad de Palencia. (2018). *Inventario de pozos mecánicos Cantón Rincón de la Piedra, Palencia* [formato microsoft Excel].
- Musálem, K., McDonald, M. M., Jiménez, F., & Laino, R. (2015). Groundwater Vulnerability Mapping in Two Watersheds Affected by Yacyreta Dam in Paraguay. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *6*(6), 49-61.
- Musy, A., & Higy, C. (2011). *Hydrology: a science of nature* (R. Bryant, J. Abou Nohra, & Mohan Eds.). Enfield, USA: Science Publishers.
- Napolitano, P., & Fabbri, A. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, *235*, 559-566.

- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Texas, USA: Autor.
- Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). *Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series*: CRC Press.
- Orozco Orozco, E., Herrera Ibáñez, I. R., & Mujica Cervantes, A. (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.
- Panagopoulos, G., Antonakos, A., & Lambrakis, N. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 894-911.
- Pérez, C. L. (2009). Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distension. *Revista Geológica de América Central*(41), 71-78.
- Pinder, G. F., & Celia, M. A. (2006). *Subsurface hydrology*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Poehls, D., & Smith, G. J. (2011). *Encyclopedic dictionary of hydrogeology*: Academic press.
- Ramírez Mejía, L. L. (2003). *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad capital de Guatemala*. (Tesis), Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Ribeiro, L. (2005). Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos à contaminação: Formulação e Aplicações in Actas do 7º SILUSBA, APRH. Évora, Portugal.
- Rivera, P. (2005). Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación en pozos de la microcuenca del río Pansalic, Mixco, Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 2(1), 16-21.
- Rosen, L. (1994). A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Groundwater*, 32(2), 278-285.

- Secunda, S., Collin, M., & Melloul, A. J. (1998). Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of environmental management*, 54(1), 39-57.
- Şen, Z. (2014). *Practical and applied hydrogeology*. Istanbul, Turkey: Elsevier.
- Sloan, P., & Moore, I. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply Sloping Forested Watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815-1822.
- Su, X., Yuan, W., Xu, W., & Du, S. (2015). A groundwater vulnerability assessment method for organic pollution: a validation case in the Hun River basin, Northeastern China. *Environmental Earth Sciences*, 73(1), 467-480.
- Tábora, F., Basterrechea, M., Candanedo, H., Wallace, M., Kawas, N., Artiga, R., . . . Paquet, G. (2011). *Situación de los recursos hidricos en Centroamerica: Hacia una gestión integrada* F. Tabora & M. Arguello (Eds.), (p. 143). Recuperado de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam\\_files/situaciondelosrecursoshidricos.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situaciondelosrecursoshidricos.pdf)
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology*. United States: Jonh Wiley & Sons.
- Vignola, R. (2005). *Fortalecimiento de instrumentos decisionales para la provisión de agua para consumo humano en El Salvador*. (Tesis), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- World Meteorological Organization, & United Nations Educational, S. a. C. O. (2012). *International Glossary of Hydrology*. Ženeva, Švajčiarsko.
- Zalewski, M., & Wagner-Lotkowska, I. (2004). Integrated watershed mangement: ecohydrology & phytotechnology. Manual *Integrated watershed mangement: ecohydrology & phytotechnology. Manual*: UNESCO.
- Zhang, R., Hamerlinck, J. D., Gloss, S. P., & Munn, L. (1996). Determination of nonpoint-source pollution using GIS and numerical models. *Journal of environmental quality*, 25(3), 411-418.

## ANEXOS

### Anexo 1. Descripción de las unidades cartográficas de suelo (UCS)

**Tabla XVI. Unidades cartográficas de suelo utilizadas para modelar recarga hídrica con la herramienta SWAT**

<b>UCS</b>	<b>Nombre vernáculo</b>	<b>Orden</b>
MBC	Consociación Los Yoques	Molisoles
MSF	Consociación Las Nubes	Andisoles
AQB	Consociación Ojo de Agua	Inceptisoles
MBB	Consociación Santa Catarina	Inceptisoles
ABK	Grupo indiferenciado La Cuya	Inceptisoles
MBE	Consociación El Sombrerito	Inceptisoles
ABF	Consociación Ciénaga Grande	Inceptisoles
ABB	Consociación Arrazola	Inceptisoles
ABL	Consociación Las Flores	Inceptisoles
MBI	Consociación Pulté	Inceptisoles
AQF	Consociación Valle de la Ermita	Molisoles
MQH	Consociación Sierra de Palencia	Inceptisoles
MQD	Consociación Buena Vista	Molisoles
MQF	Consociación Pueblo Nuevo	Inceptisoles
SQL	Consociación Villa Canales	Inceptisoles
MSC	Consociación Pinula	Andisoles
MSG	Consociación San Francisco	Andisoles
ABD	Consociación Agua Tibia	Inceptisoles
ACA	Grupo indiferenciado Barrancos de Guatemala	Inceptisoles
MBK	Consociación Lourdes	Inceptisoles
MBM	Consociación Río Concepción	Inceptisoles
MCB	Grupo indiferenciado El Tabacal	Entisoles
ABJ	Consociación El Potrerón	Inceptisoles
MSK	Consociación El Perotal	Inceptisoles
AQJ	Consociación El Farito	Molisoles
AQL	Consociación Villalobos	Inceptisoles
MQN	Consociación El Pepinal	Molisoles
AQA	Consociación Cerro El Naranja	Inceptisoles
ABE	Consociación Aceitillal	Inceptisoles
MQT	Consociación La Piedrona	Molisoles
MQY	Consociación El Chato	Molisoles

<b>UCS</b>	<b>Nombre vernáculo</b>	<b>Orden</b>
MSL	Consociación Castilla	Andisoles
MQE	Consociación Rancho Quemado	Inceptisoles
MQV	Consociación Los Paternales	Inceptisoles
CA	Cuerpos de agua	N/A
CN	Consociación área de Canteras	N/A
ME	Consociación áreas misceláneas erosionadas	N/A
MSH	Consociación Temastepeque	Inceptisoles
MQÑ	Consociación Las Victorias	Molisoles

Fuente: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo (2017).