

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Vulnerabilidad de acuíferos en la zona de recarga de la concesión
minera Janeth 3 de la empresa Ruta de Cobre S. A.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Minas

Presentado por:

Luis Jordan Aguilar Salas

Jesús Gregory Klinger Landázuri

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

A Dios por ser mi luz y mi guía durante todos estos años para poder culminar mi carrera.

A mis padres, Hermes y Bilma, por cuidar siempre de mí, brindarme su amor incondicional y tratar de darme la mejor educación.

A mis hermanos, por ser mi inspiración y cuidar a nuestros padres en mi ausencia.

Y a mi novia Danyely, por su sinceridad, amistad y paciencia en este largo camino.

Luis Jordan Aguilar Salas.

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme la paciencia,
inteligencia y salud para enfrentar todo
problema.

A mis padres por ser mis maestros en
la vida y mostrarme su apoyo
incondicional, amor y preocupación en
cada desafío y etapa.

Jesús Klinger Landázuri.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de todo corazón a la Ph. D. Paola Romero Crespo por entregarnos la confianza, tiempo, experiencia y conocimiento a lo largo del proyecto integrador.

A nuestro tutor el MsC. René Ayala Lomas por el apoyo y confianza en todas las actividades presentadas.

A la Ph. D. Samantha Jiménez Oyola por la paciencia y guía en la realización de nuestra memoria técnica y presentaciones.

Los Autores.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Luis Jordan Aguilar Salas* y *Jesús Gregory Klinger Landázuri*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la investigación por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Luis Jordan
Aguilar Salas



Jesús Gregory
Klinger Landázuri

EVALUADORES



Ph. D. Samantha Jiménez Oyola

PROFESOR DE LA MATERIA

MsC. René Ayala Lomas

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El agua subterránea es un recurso natural indispensable para la minería. Su creciente demanda, debido a la escasez de agua superficial, ha provocado que los acuíferos sean más vulnerables a la contaminación. El presente proyecto evaluó el grado de vulnerabilidad al que están expuestos los acuíferos ubicados en las zonas de recarga hídrica de la concesión minera Janeth 3 de la empresa Ruta de Cobre S. A.; considerando como hipótesis que la zona de recarga hídrica presenta un alto grado de vulnerabilidad a la contaminación. En este proyecto se aplicaron los métodos GOD y DRASTIC para evaluar espacialmente las zonas con mayor riesgo de contaminación al agua subterránea. Con base en los parámetros analizados, el método GOD mostró que el 100% del área de estudio presenta una vulnerabilidad baja a muy baja, mientras que el método DRASTIC determinó que el 96% del área presenta un grado de vulnerabilidad intrínseca baja a muy baja y un 4% presenta una vulnerabilidad moderada. El proyecto reveló que las características hidrogeológicas del área de estudio están relacionadas con la litología, siendo las zonas compuestas por rocas moderadamente fracturadas y de permeabilidad baja las menos susceptibles a la contaminación. La información generada en este proyecto puede servir como referencia para la gestión ambiental y para la protección de las fuentes de agua subterránea en las áreas de influencia de las concesiones mineras, con la finalidad de garantizar una gestión del agua adecuada en el marco de una minería responsable y sostenible.

Palabras Clave: Agua subterránea, Método GOD, Método DRASTIC, Vulnerabilidad intrínseca, Modelo hidrogeológico conceptual.

ABSTRACT

Groundwater is an indispensable natural resource for mining. Its growing demand, due to the scarcity of surface water, has made aquifers more vulnerable to contamination. This project evaluated the degree of vulnerability to which the aquifers located in the water recharge zones of the Janeth 3 mining concession of Ruta de Cobre S.A. are exposed; considering as a hypothesis that the water recharge zone presents a high degree of vulnerability to contamination. In this project, the GOD and DRASTIC methods were applied to spatially evaluate the areas with the highest risk of groundwater contamination. Based on the parameters analyzed, the GOD method showed that 100% of the study area has low to very low vulnerability, while the DRASTIC method determined that 96% of the area has low to very low intrinsic vulnerability and 4% has moderate vulnerability. The project revealed that the hydrogeological characteristics of the study area are related to lithology, with areas composed of moderately fractured rocks and low permeability being the least susceptible to contamination. The information generated in this project can serve as a reference for environmental management and for the protection of groundwater sources in the areas of influence of mining concessions to ensure proper water management within the framework of responsible and sustainable mining.

Keywords: Groundwater, GOD method, DRASTIC method, Intrinsic vulnerability, Conceptual hydrogeological model.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Acuíferos.....	4
1.4.2 Vulnerabilidad de acuíferos.....	4
1.4.3 Casos de estudio nacionales e internacionales de vulnerabilidad de acuíferos 7	
CAPÍTULO 2	10
2. Metodología.....	10
2.1 Recopilación y análisis de información	11
2.2 Modelo conceptual	12

2.2.1	Caracterización del área de estudio	12
2.2.2	Caracterización hidrogeológica	13
2.2.3	Geología	13
2.2.4	Estudio hidrogeológico	15
2.2.5	Límites hidrogeológicos.....	16
2.2.6	Unidades hidrogeológicas	16
2.2.7	Perfiles hidrogeológicos	17
2.2.8	Análisis hidroquímico	17
2.2.9	Balance Hídrico.....	18
2.3	Metodologías GOD y DRASTIC para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos	20
2.3.1	Método GOD.....	20
2.3.2	Método DRASTIC	23
2.4	Construcción del bloque del modelo hidrogeológico conceptual	27
2.5	Modelo matemático hidrogeológico del área de estudio	27
CAPÍTULO 3		29
3.	Resultados y análisis	29
3.1	Hidrogeología	29
3.1.1	Suelo.....	29
3.1.2	Unidades hidrogeológicas	30
3.1.3	Análisis hidroquímico	32
3.2	Análisis del balance hídrico	33
3.3	Análisis de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.....	34
3.3.1	GOD.....	34
3.3.2	DRASTIC	35
3.4	Análisis del modelo conceptual.....	37

3.5	Análisis del modelo numérico	38
CAPÍTULO 4		39
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	39
	Conclusiones.....	39
	Recomendaciones.....	40
BIBLIOGRAFÍA		42
APÉNDICES.....		45

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral.
LORHUyA	Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.
RDC	Ruta de Cobre.
EPA	Environmental Protection Agency.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
UH	Unidad hidrogeológica.
SIN	Sistema Nacional de Información .
MAATE	Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica.
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
SIGAGRO	Sistema de Información Geográfica y del Agro.
ZRH	Zona de Recarga Hídrica.
ETP	Evapotranspiración potencial.
ETR	Evapotranspiración real.
DEM	Digital Elevation Model.
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.
DRASTIC	Acrónimo del método de determinación de la vulnerabilidad en acuíferos (Aller et al., 1987).
GOD	Acrónimo del método de determinación de la vulnerabilidad en acuíferos (Foster, 1987).
POSH	Método de clasificación de la carga contaminante potencial.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

SIMBOLOGÍA

km ²	kilómetro cuadrado.
km	Kilómetro.
m	Metro.
cm	Centímetro.
m/d	Metro por día.
mm	Milímetro.
mg	Miligramo.
mEq	Miliequivalentes.
pH	Potencial de Hidrógeno.
μs	Micro siemens.
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato.
SO ₄ ⁻	Sulfato.
Cl ⁻	Cloruro.
Ca ⁺²	Calcio.
Mg ⁺²	Magnesio.
Na ⁺	Sodio.
K ⁺	Potasio.
CaCO ₃	Carbonato de calcio.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Metodología aplicada para la determinación de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.....	10
Figura 2.2 Información recopilada del área de estudio	12
Figura 2.3 Mapa de ubicación de la concesión Janeth 3 y la ZRH.....	13
Figura 2.4 Mapa geológico del área de estudio	14
Figura 2.5 Clasificación de los materiales según su permeabilidad	16
Figura 2.6 Diagramas de Piper	17
Figura 2.7 Descripción del método GOD	20
Figura 2.8 Descripción del método DRASTIC.....	20
Figura 3.1 Tipo de suelo del área de estudio: franco limoso.....	29
Figura 3.2 B y D. Imagen de microscopio de transmisión en nicoles paralelos. C y E. Imágenes en nicoles cruzados.	30
Figura 3.3 Diagrama Piper.....	33
Figura 3.4 Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio, método GOD.	35
Figura 3.5 Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio, método DRASTIC.....	36
Figura 3.6. Modelo conceptual.....	37
Figura 3.7 Modelo numérico, escenario promedio	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Condición de confinamiento del acuífero	21
Tabla 2.2 Índice del sustrato litológico	21
Tabla 2.3 Índice de la profundidad del nivel de agua subterránea	22
Tabla 2.4 Clasificación del nivel de vulnerabilidad del método GOD	22
Tabla 2.5 Valores de profundidad de los niveles piezométricos.....	23
Tabla 2.6 Valores de la recarga neta al acuífero	23
Tabla 2.7 Valores del medio acuífero	24
Tabla 2.8 Valores del medio del suelo	24
Tabla 2.9 Valores de topografía.....	25
Tabla 2.10 Valores de la zona vadosa.....	25
Tabla 2.11 Valores de conductividad hidráulica.....	26
Tabla 2.12 Pesos asignados a los parámetros del método DRASTIC	26
Tabla 2.13 Clasificación del nivel de vulnerabilidad del método DRASTIC	27
Tabla 3.1 Identificación de unidades hidrogeológicas.....	31
Tabla 3.2 Valores de infiltración y recarga en la zona de estudio	34

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son fundamentales para diversas actividades industriales. En el sector minero, este elemento es crucial para sus operaciones, por ello, ha incorporado procesos de recirculación de agua, permitiendo que su consumo no sea muy alto. Según Ofosu & Sarpong (2022). Independientemente de que la minería sea artesanal o de pequeña escala, la incorporación de actividades y hábitos organizacionales bien definidos en su plan de trabajo contribuye a la gestión sostenible del agua en la práctica minera.

A pesar de que se dispone de acciones políticas que velan por la conservación y protección de los recursos hídricos, tal como señala el artículo 13 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA) y el artículo 411 de la Constitución de la República del Ecuador, aún existe la necesidad de políticas que se centren en iniciativas que prevengan la contaminación de los recursos hídricos subterráneos.

El agua superficial proveniente de precipitaciones, ríos y lagos es la principal fuente de abastecimiento de agua para las labores mineras. La escasez de este elemento en algunas zonas, causadas por actividades antropogénicas, ha llevado a empresas y pobladores considerarse competidores, por lo que ambos actores han optado por buscar nuevas fuentes para su subsistencia (Saenz, 2022). Es por ello por lo que, el agua subterránea juega un papel importante en las operaciones mineras, ya que no solo es una buena alternativa para satisfacer la demanda del recurso hídrico, sino que también se deben seguir medidas preventivas para asegurar que los acuíferos disponibles no se contaminen.

Según Ouakili y Chippo (2012), un acuífero es una zona bajo la superficie con capacidad para almacenar y transmitir agua a través de sus poros intersticiales. Tener conocimiento sobre el tipo de agua que almacena, el valor de sus parámetros hidrodinámicos, la recarga, las características del suelo y de la zona no saturada y saturada son algunos de los factores más determinantes a la hora de

evaluar la vulnerabilidad intrínseca, información que a futuro servirán como insumo para los estudios de factibilidad (Ruiz & Martinez, 2015).

El presente trabajo tiene como finalidad realizar un análisis de la información hidrogeológica del área de estudio de cara a la gestión conjunta de las partes involucradas en la protección de los recursos hídricos, asegurando así su preservación, calidad y uso racional. Esto se logrará aplicando los métodos DRASTIC y GOD, para la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos en las zonas de recarga de la concesión minera Janeth 3 de la empresa Ruta de Cobre S. A.

1.1 Descripción del problema

Los acuíferos contienen el agua subterránea que se considera como recurso indispensable para beneficio humano y natural. Su capacidad protectora se debe a la superposición de diferentes capas, lo que reduce el efecto de los lixiviados que se filtran a través de la superficie. No obstante, ocurre una vulnerabilidad elevada de los acuíferos cuando las cargas contaminantes llegan fácilmente en mayor cantidad y hacen contacto con el agua subterránea.

Debido a las diferentes actividades antropogénicas en el cantón Cuenca y exclusivamente en la concesión minera Janeth 3, se debe tener información sobre el grado de vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo en el área de la concesión minera. Los estudios hidrogeológicos realizados en el cantón Cuenca delimitan y definen las zonas de recarga hídrica y la vulnerabilidad en acuíferos por medio de parámetros de aguas superficiales. Sin embargo, el uso de estos parámetros no es suficiente, ya que no garantiza una demarcación adecuada, al no considerar las variables litológicas, hidrogeológicas e hidrológicas que son importantes para definir las áreas con mayor vulnerabilidad.

1.2 Justificación del problema

Los resultados obtenidos de esta investigación serán una fuente de consulta para la autoridad en la definición de zonas de recarga hídrica del cantón Cuenca y del país. Además, permitirá mejorar los insumos de información de la empresa Ruta de Cobre S. A. para determinar las áreas de mayor vulnerabilidad que podrían verse afectadas durante el proceso de instalación de las operaciones mineras.

En este trabajo de investigación se aplicaron dos metodologías (GOD y DRASTIC) para identificar y analizar espacialmente las áreas con mayor riesgo de contaminación de aguas subterráneas. De esta forma, se obtuvieron los criterios técnicos y científicos que servirán como línea base para la implementación de estrategias y/o medidas preventivas encaminadas a la protección de los recursos hídricos subterráneos en zonas establecidas como de recarga hídrica de la concesión minera Janeth 3 del proyecto Ruta de Cobre.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos en las zonas de recarga hídrica de la concesión minera Janeth 3, utilizando los métodos GOD y DRASTIC para la identificación de las áreas con mayor riesgo de contaminación de cara a la gestión de los recursos hídricos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar la hidrogeología de la zona de recarga hídrica para la determinación del comportamiento de las aguas subterráneas.
- Caracterizar hidroquímicamente las muestras de agua extraídas de los pozos, para la identificación del tipo de agua disponible.

- Evaluar el nivel de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, mediante la implementación de los métodos GOD y DRASTIC.
- Analizar el riesgo a la contaminación de los acuíferos, para la gestión del agua previo al inicio de la instalación de las operaciones mineras.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Acuíferos

En hidrología, acuífero es probablemente el término que tiene más características añadidas a su significado. Se define como una unidad geológica saturada y permeable capaz de transportar grandes volúmenes de agua bajo gradientes hidráulicos normales (Freeze & Cherry, 1979). Asimismo, Todd (como se citó en Custodio Gimena & Llamas Madurga, 1983a) afirma que la formación geológica de los acuíferos es representada con mayor frecuencia por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como arenas, gravas, mezclas de ambos, etc. Esto se debe a que hay una mejor o mayor porosidad y permeabilidad teniendo en cuenta que existen más parámetros que hacen posible la formación de acuíferos.

1.4.2 Vulnerabilidad de acuíferos

La vulnerabilidad enfocada a los acuíferos es un término que fue reconocido por primera vez por el científico francés J. Margat en 1963. Desde entonces, se han establecido distintas definiciones que se han mejorado con el tiempo. Considerando aspectos como el origen y las propiedades de los impactos, Fernández (2012) plantea que la vulnerabilidad de acuíferos “Es una función de las características hidrogeológicas del acuífero, de los suelos y material geológico que lo rodean, dependiente directamente del origen y propiedades del factor impactante” (p. 343).

La vulnerabilidad de los acuíferos guarda estrecha relación con las actividades antropogénicas e inclusive con la naturaleza. Los posibles orígenes de la contaminación de los acuíferos son diversos y es complicado de recopilar todos y sintetizarlos. Siguiendo en parte a Schoeller (como se citó en Custodio Gimena & Llamas Madurga, 1983), se puede tener la siguiente clasificación: Contaminación por actividades domésticas, labores agrícolas, ganadería, actividades nucleares, a través de pozos mal construidos o abandonados, a través de sistemas de vertido de aguas residuales, pozos de inyección, actividades mineras, actividades industriales, vertido de desechos y a causa de acciones químicas provocadas sobre el ciclo del agua.

Hay varias formas de determinar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. Algunos de los más utilizados son los métodos GOD y DRASTIC. Estos intentan utilizar el rango de clasificación de cada una de sus variables para determinar la vulnerabilidad inherente del acuífero.

1.4.2.1 Métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos

Metodología GOD

El método GOD es empleado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos, tiene como ventaja el uso de solo tres parámetros lo cual lo hace uno de los métodos más prácticos de usar. Es un modelo con característica multiplicativa, ya que tiene presente variables que corresponden a la distancia o profundidad al nivel del agua subterránea, ocurrencia del sustrato litológico y grado de confinamiento. Al evaluar cada variable se lo hace con calificaciones cuantitativas de cero a uno que provocan una variabilidad en el índice ya antes mencionado. (Diaz et al., 2013)

De acuerdo con el artículo "Análisis de vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la unidad hidrogeológica Huaquillas" (Alulema Del Salto & López Vera, 2016) las siglas GOD se definen de la siguiente manera:

- a) Grado de confinamiento (G):** De acuerdo con la porosidad y permeabilidad de las capas suprayacentes se denota la sencillez con que algún fluido se filtre y forme un acuífero, a su vez determinar el tipo al que pertenece.
- b) Ocurrencia del sustrato litológico (O):** se refiere a las variables litológicas como porosidad, compactación y el tipo de roca ubicado en un acuífero. Se toma en cuenta si en el sustrato suprayacente existen rocas consolidadas o no consolidada, esta última denota mayor porosidad debido a que no son compactas. Un punto importante para la infiltración de sustancias contaminantes son los espacios que están vacíos entre sedimentos, debido a esto se genera una gran facilidad de circulación de los fluidos.
- c) Distancia al nivel del agua subterránea (D):** Este parámetro evalúa la probabilidad de que los contaminantes lleguen al depósito de agua subterránea, esto quiere decir que mientras este se acerque más a la superficie, tiene mayor riesgo de contaminación.

Metodología DRASTIC

El método fue propuesto por la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (Aller et al., 1987) para la cualificación y el mapeo de la vulnerabilidad. Su finalidad es evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos considerando sólo aquellas propiedades que conciernen al medio, más no la influencia de las sustancias contaminantes (Auge, 2007). Según Ruiz & Martínez (2015), este método se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), tomando en

cuenta las características y el comportamiento de los siguientes parámetros hidrogeológicos consideradas:

- a) Profundidad del nivel freático (D):** bajo la superficie de la tierra (numérico).
- b) Recarga neta (R):** la recarga recibida por el acuífero (numérico).
- c) Litología del acuífero (A):** se refiere a la estructura del medio acuífero (por categorías).
- d) Tipo de suelo (S):** (por categorías)
- e) Topografía (T):** se refiere a la pendiente del terreno de estudio (numérico por categorías).
- f) Impacto de la zona no saturada (I):** (por categorías).
- g) Conductividad hidráulica del acuífero (C):** (numérico).

Según Auge (2007), además de valorar cada parámetro hidrogeológico, también se tiene en cuenta su influencia en relación con la evaluación de la vulnerabilidad asignándole índices entre 1 y 5. La valoración final para esta metodología se obtendrá multiplicando y sumando los productos de cada parámetro considerado anteriormente.

1.4.3 Casos de estudio nacionales e internacionales de vulnerabilidad de acuíferos

En cuanto al tema evaluación de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación en el sector minero, a nivel internacional, existen varias investigaciones, de las cuales pueden destacar las siguientes:

- a) Mapping global vulnerability index in mining sectors: A case study Moulares-Redayef aquifer system, southwestern Tunisia.** Este estudio se realizó en el acuífero Moulares-Reayed, al suroeste de Túnez, el cual es una zona cercana a minas de fosfato. Khelif et al. (2016) aplican el método del índice

de vulnerabilidad global, integrando datos hidrogeológicos e hidrodinámicos que permiten un mapeo completo de las zonas saturadas. Los datos obtenidos mostraron que los valores más altos de nitrato ocurrieron en áreas altamente vulnerables.

b) Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China. Esta investigación fue realizada en una región del Oeste de China que se considera muy frágil en términos ambientales. Lv et al., (2019) desarrollaron un modelo de evaluación para calcular el índice de vulnerabilidad ecológica de la zona en un periodo de 10 años con la finalidad de mejorar la sostenibilidad ambiental de la producción de carbón. Los citados autores concluyeron que, a pesar del aumento de la superficie utilizada por el sector industrial y minero, la vulnerabilidad ecológica aumentó ligeramente.

Por otro lado, en Ecuador los estudios relacionados con la vulnerabilidad de acuíferos se han desarrollado principalmente en áreas agrícolas y en menor proporción en áreas mineras.

c) Evaluación del riesgo a la contaminación de acuíferos en las cunecas de los ríos Gala, Tenguel y Siete del distrito minero de Ponce Enríquez. Realizado por Campoverde Muñoz (2021) en el distrito minero Ponce Enríquez. En este estudio se evaluó el riesgo de contaminación de acuíferos, teniendo en cuenta el supuesto de que las actividades mineras son responsables del alto riesgo de contaminación. En ese estudio se utilizó sistemas de información geográfica, el método DRASTIC y el índice de peligro POSH, y se concluyó que la actividad que presenta el mayor riesgo de contaminación para los acuíferos es la agrícola.

- d) Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method.** El estudio se centra en un acuífero ubicado en la cuenca del Río Guayas, donde existe un riesgo potencial de contaminación por nitratos provenientes del cultivo de arroz. Ribeiro et al., (2017) utilizaron cuatro variables del método DRASTIC, agregando el uso de suelo como nuevo parámetro, del cual determinaron que las áreas con alta vulnerabilidad son aquellas dentro del perímetro de riego de este cultivo.
- e) Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde.** Realizado por Loo Bruno et al. (2019) en el cantón Gral. Antonio Elizalde, provincia del Guayas. Se utilizó el método DRASTIC para evaluar las condiciones morfológicas e intrínsecas del acuífero, y finaliza con la recomendación de buenas prácticas para el sector agropecuario de la zona.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para este proyecto se consideraron cuatro fases. La Figura 2.1 muestra un diagrama de la metodología utilizada para elaborar los mapas de índice de peligrosidad y vulnerabilidad. Estos mapas se emplearon para evaluar el riesgo que enfrentan los sistemas acuíferos con fuentes potenciales de contaminación. Todo esto fue posible gracias a las ventajas tecnológicas que proporciona la incorporación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que almacenan y procesan información, pudiendo integrar toda la información recopilada en un único mapa.

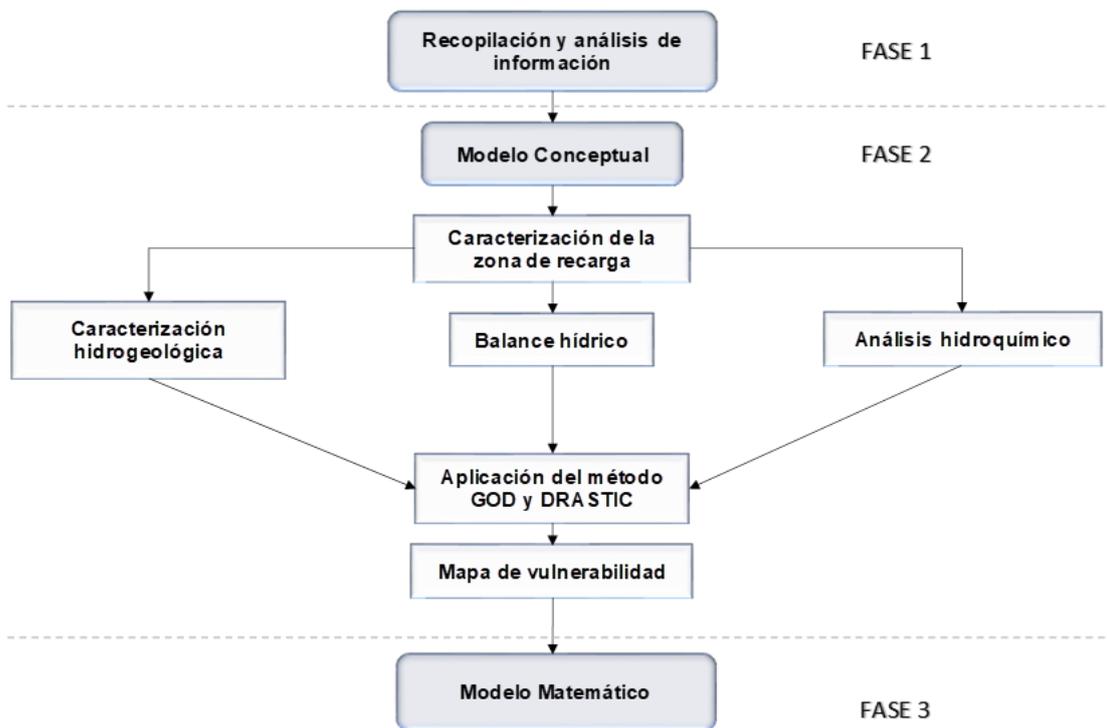


Figura 2.1 Metodología aplicada para la determinación de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.

2.1 Recopilación y análisis de información

En esta fase se buscó y analizó todos los datos disponibles que influyen en la caracterización hidrogeológica del área de estudio. Como resultado de esta búsqueda, se obtuvieron datos cartográficos, hidrológicos, geológicos, hidrometeorológicos, inventarios de puntos de agua y datos hidroquímicos. La gestión integrada de la información obtenida de fuentes primarias y secundarias permitió saber lo que está ocurriendo en esta zona y definir el comportamiento del acuífero.

Se obtuvo lo siguiente:

- Información cartográfica en base a los archivos en formato shapefile encontrados en la base de datos del Sistema Nacional de Información (SNI).
- La delimitación definitiva de la zona de recarga hídrica del cantón Cuenca remitido el 28 de octubre de 2021 a la autoridad del municipio por parte del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).
- Coordenadas de la concesión minera Janeth 3 obtenidas del Catastro Minero.
- Del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) se recopilaron datos hidrometeorológicos de las estaciones ubicadas en la provincia de Azuay.
- La geología regional fue obtenida del estudio realizado en la Parroquia Chaucha por parte del grupo multidisciplinario conformado por funcionarios del Centro de Levantamientos Integrado de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), del Sistema de Información Geográfica y del Agro (SIGAGRO) y de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.

2.2 Modelo conceptual

2.2.1 Caracterización del área de estudio

La caracterización se realizó en la intersección de la Concesión minera Janeth 3 y la zona de recarga hídrica (ZRH) del cantón Cuenca delimitada por el MAATE. La limitada cantidad de datos, exigió la realización de trabajo de campo para la obtención de información, toma de muestras de suelo y agua, y para la extrapolación de los datos existentes necesarios para la ejecución del proyecto. La información base para la caracterización se presenta en el apartado 2.1.

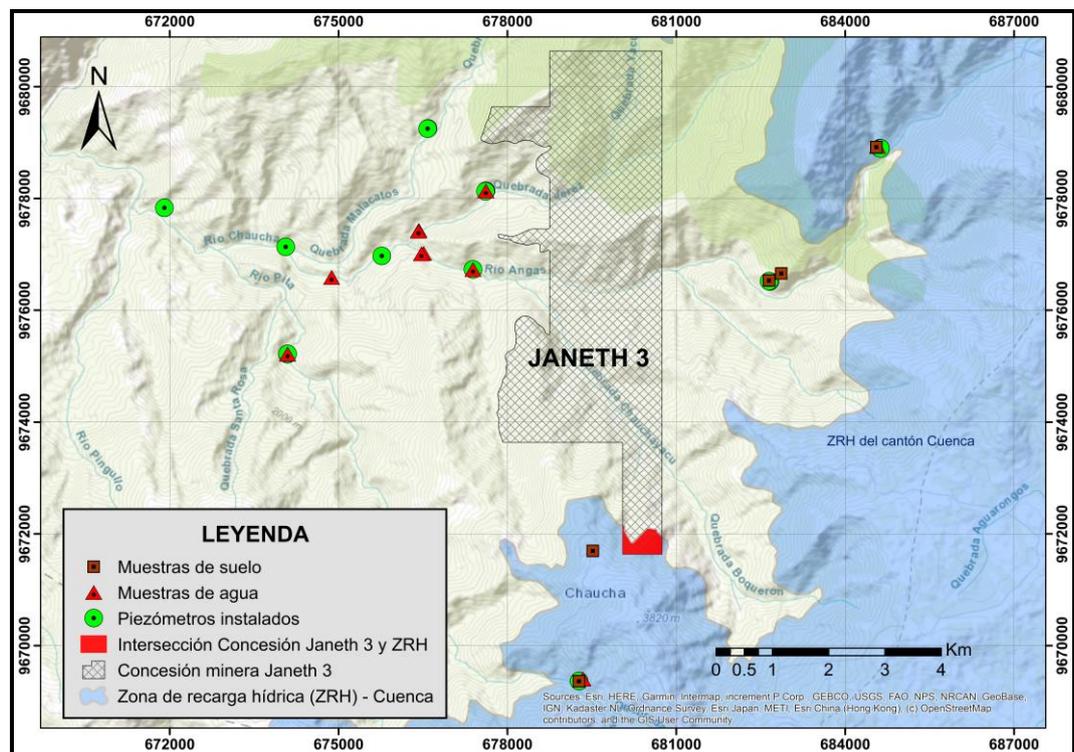


Figura 2.2 Información recopilada del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región subandina de la cordillera occidental de los andes ecuatorianos, específicamente en la concesión minera Janeth 3, ubicada en la parroquia de Chaucha, Cantón Cuenca, provincia de Azuay, entre los 3320 y 3560 m.s.n.m. Para llegar a la concesión se parte desde la ciudad de Cuenca por una vía afirmada que atraviesa la localidad Soldados, un recorrido total de 79 km en un tiempo estimado de 2 horas.

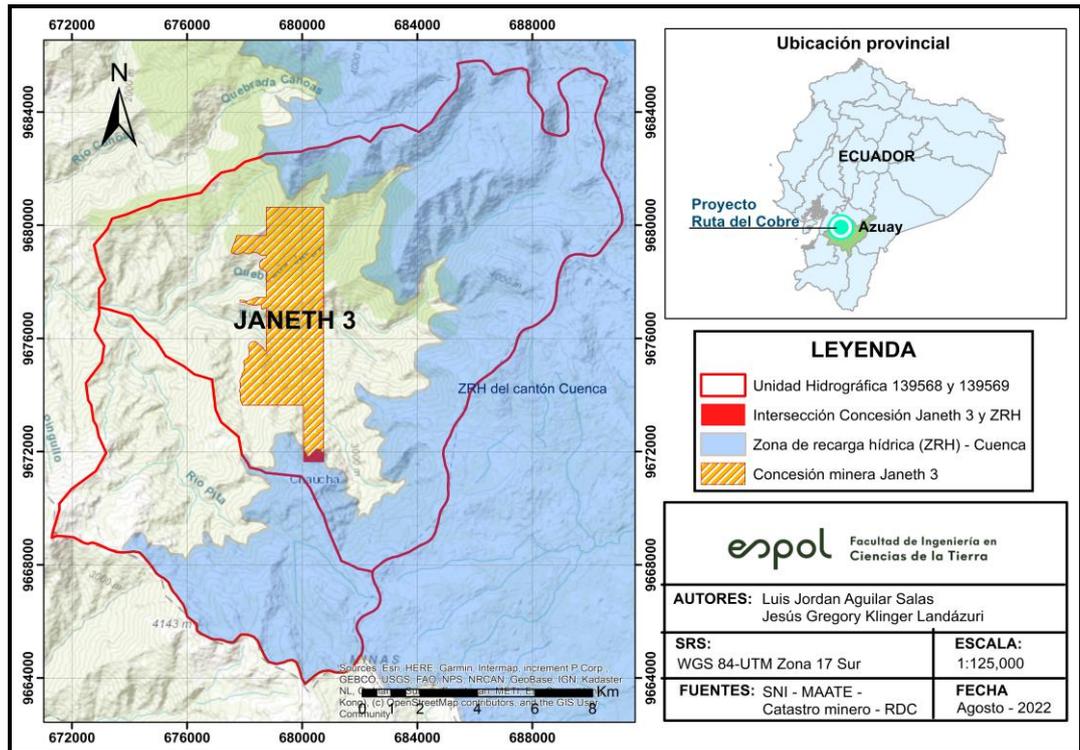


Figura 2.3 Mapa de ubicación de la concesión Janeth 3 y la ZRH

2.2.2 Caracterización hidrogeológica

La geología es uno de los complementos a la hora de una caracterización hidrogeológica, debido a que el reconocimiento geológico, litológico, estratigráfico y de fallas me permite establecer posteriormente todos los parámetros considerados en la hidrogeología.

2.2.3 Geología

Para determinar la geología y litología próximos a la zona se hicieron 15 perforaciones diamantinas realizadas por la empresa Ecuadrill S.A. y supervisadas por la empresa consultora SRK Consulting Perú, que corresponden a las concesiones Janeth 1 y Janeth 2, las perforaciones fueron a profundidades que varían entre 200 a 500 metros que comprendieron la instalación de los piezómetros (Huaco, 2021).

El resultado de estas perforaciones mostró que en los metros iniciales hay una cobertura de material no consolidado que corresponde a depósitos aluviales y coluviales, posteriormente se encontró una zona de suelo residual compuesta por granodiorita y andesita descompuesta por meteorización. A profundidades mayores se determinó que hay roca andesita, granodiorita, pórfido feldespático y brechas intrusivas intercaladas con roca tipo pórfido cuarzo feldespático de calidad buena. (SRK Consulting (Perú) S.A., 2022). Se elaboró un mapa de datos base que contengan los puntos de ubicación de los piezómetros el cual va a servir como herramientas claves para la interpolación de datos, creando información nueva que nos aproxime a una situación real con respecto a la hidrogeología. Con la información que tenemos del terreno de las concesiones aledañas podemos crear un modelado hidrológico que nos muestre el movimiento del agua subterránea concentrada en la intersección antes mencionada.

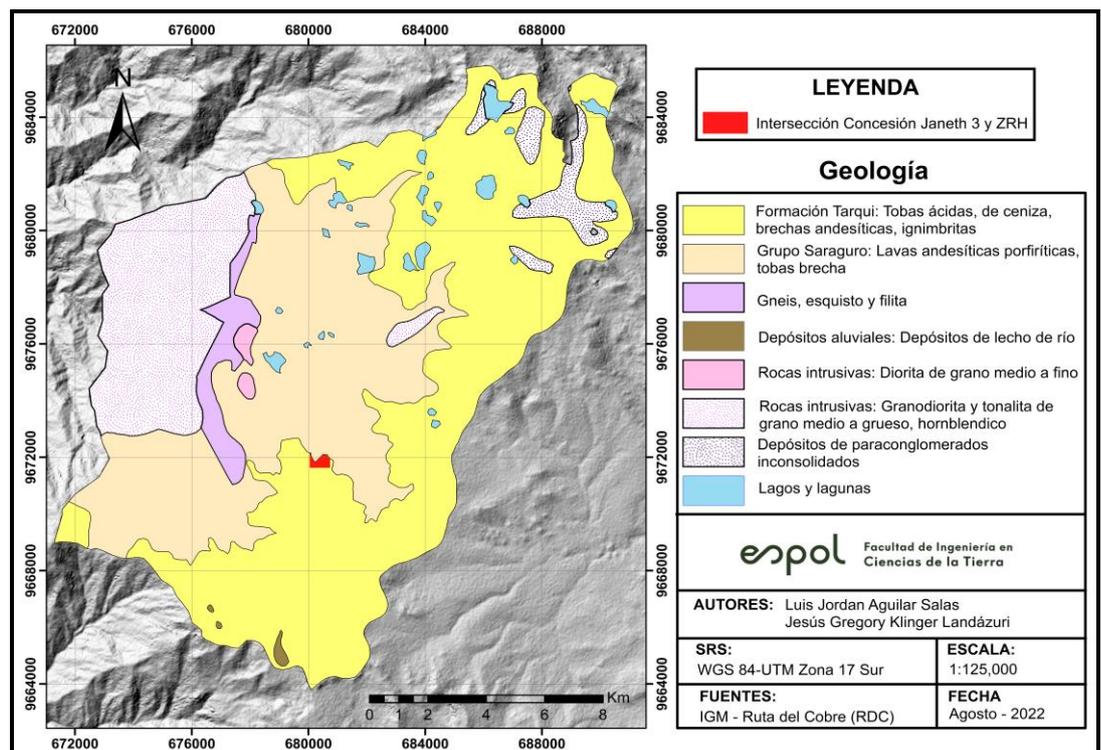


Figura 2.4 Mapa geológico del área de estudio

2.2.4 Estudio hidrogeológico

Para un correcto estudio hidrogeológico es importante seguir el siguiente orden:

1. **Límites hidrogeológicos:** Permite definir el comportamiento de la piezometría, el área y sus unidades acuíferas. Para determinarlos se parte de la base geológica y las unidades litológicas disponibles que por lo general contienen información de la variación de los niveles freáticos y las fallas existentes.
2. **Unidades hidrogeológicas:** Se establece las unidades hidrogeológicas a las que van a pertenecer uno o más acuíferos existentes en la zona de estudio.
3. **Perfiles hidrogeológicos y tectónica:** Este perfil se crea a partir de las columnas estratigráficas disponibles en el área de estudio. En él se puede observar la unidad estratigráfica que coincide con la piezometría o nivel freático, además de la formación geológica a la que pertenecen y los acuíferos conectados.
4. **Vista superficial del área de estudio:** Mediante un mapa de la zona se puede observar la litología, la ubicación de los pozos perforados y los límites de las unidades hidrogeológicas.
5. **Balance hídrico:** Se calcula según el método de Thornthwaite con parámetros como la precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y real, déficit y excedente hídrico, infiltración y recarga. Se recomienda utilizar los datos más fiables, es decir, estaciones con bases de datos de varios años.

2.2.5 Límites hidrogeológicos

Los límites encontrados para determinar el área de estudio obedecen a parámetros estratigráficos, geológicos y de cuenca. A partir de las columnas estratigráficas de los diferentes pozos construidos se detalló la litología en cada perfil de profundidad, lo que permitió determinar las unidades hidrogeológicas.

La zona de estudio fue delimitada por las unidades hidrográficas 139568 y 139569 de nivel 6 a escala 1:50 000. En esta área se encuentra una base geológica de rocas volcánicas de una moderada a una intensa fracturación, con permeabilidades que varían de bajo a media. Éstas pertenecen a las formaciones Tarqui y Saraguro, del período cuaternario y terciario respectivamente.

2.2.6 Unidades hidrogeológicas

Para definir las unidades hidrogeológicas de la zona se consideraron las propiedades y características litológicas de los materiales como la capacidad de almacenar y transmitir el agua, porosidad, permeabilidad, entre otros. Por ello, las unidades litológicas fueron clasificadas hidrogeológicamente según la Figura 2.5 de Custodio & Llamas (1983).

PERMEABILIDAD EN (m/día)											
	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Clasificación geológica	Gravas limpias		Gravas y arenas, o arenas gruesas		Arenas finas o con mezcla de limos		Limos o arcillas arenosas		Arcillas compactas		
Clasificación hidrogeológica	Buen acuífero				Acuífero pobre		Acuitardo		Prácticamente impermeable		
	0.11	0.01	1.1x10 ⁻³	10 ⁻⁴	m/s	10 ⁻⁶		10 ⁻⁸			10 ⁻¹⁰

Figura 2.5 Clasificación de los materiales según su permeabilidad

Fuente: Custodio & Llamas (1983)

2.2.7 Perfiles hidrogeológicos

El desarrollo de los perfiles hidrogeológicos presentados en el Apéndice A (p. 46) se realizó mediante un corte que pasa por los pozos RDCPZ21-08, RDCPZ21-10 y RDCPZ21-10A, RDCPZ21-09 y RDCPZ21-09A. En él se detalló el nivel freático, los cuerpos de agua, formaciones geológicas, litología, elevaciones y las unidades hidrogeológicas.

2.2.8 Análisis hidroquímico

Los análisis fisicoquímicos realizados en el Laboratorio de Sanitarias de ESPOLE permitieron determinar los principales iones mayoritarios presentes en el agua de los ríos Angas y Chaucha, las quebradas Jerez, Honda y Agua Blanca y los pozos subterráneos 08 y 09. A partir de los resultados, se realizó un balance de iones de cada muestra (Apéndice B, p. 47) para verificar que el porcentaje de error se encuentre dentro del rango permitido. Estas concentraciones se ingresaron en el software gratuito Easy Quim v5.0 (2012) para generar diagramas de Piper y Stiff, que se colocaron en mapas a escala para determinar el comportamiento del agua superficial y del acuífero, con el fin de establecer si existen conexiones de agua.

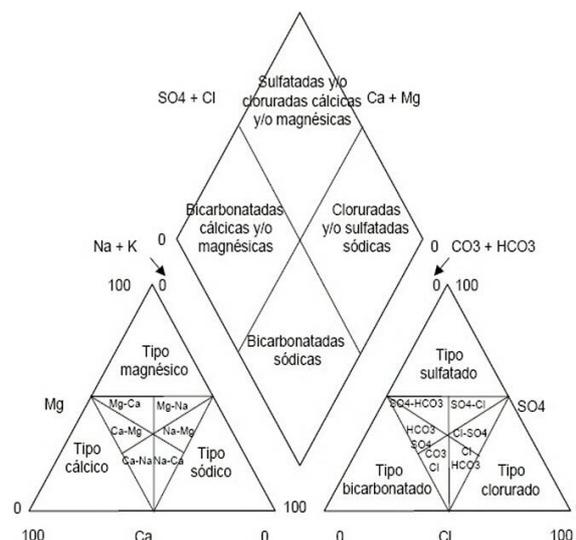


Figura 2.6 Diagramas de Piper

Fuente: Custodio & Llamas (1983)

2.2.9 Balance Hídrico

Se realizó el balance hídrico asumiendo tres escenarios: época seca, húmeda y promedio. La estación elegida como representativa para nuestra área de estudio fue el M0141 “El Labrado” (Latitud: 2° 43’ 58” S; Longitud: 79° 04’ 23”) debido a su cercanía al área de interés, similar altura sobre el nivel del mar y mayor registro histórico (31 años), lo cual le da una mayor confiabilidad.

La información fue recopilada de la base de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). A través del método Thornthwhite se calculó la precipitación (P), evapotranspiración potencial corregida (ETP_{corr}), evapotranspiración real (ETR), excedente hídrico, déficit e infiltración, parámetros claves para estimar los valores de recarga de los acuíferos presentes en el área de estudio.

La ecuación general que se utiliza para calcular el balance hídrico es la siguiente:

$$P = ETR + \text{Escorrentías} + \text{Infiltración} \quad (2.1)$$

Para calcular la evapotranspiración potencial corregida se multiplica el número máximo de horas de sol el cual depende del mes y de la altitud, con el número de días del mes.

$$ETP = ETP_{\text{SIN CORR}} (N/12) (d/30) \quad (2.2)$$

El parámetro $ETP_{\text{SIN CORR}}$ de la ecuación anterior se calcula multiplicando la temperatura media mensual en °C, el factor de 10, dividido para el índice de calor mensual, cuyo resultado se eleva a la variable “a”. El índice de calor se determina dividiendo la temperatura media mensual en °C sobre 5 y elevándolo a 1.514.

$$ETP_{\text{SIN CORR.}} = 16 [(10*t) / I]^a \quad (2.3)$$

$$I = (t/5)^{1.514} \quad (2.4)$$

$$a = 675.10^{-9} * I^3 - 771.10^{-7} * I^2 + 1972.10^{-5} * I + 0.49239 \quad (2.5)$$

Se calculó la infiltración (I) mediante la ecuación 2.6.

$$INF = LLU - ESC \quad (2.6)$$

La lluvia útil se la separa en escorrentía (ESC) e infiltración (INF) por lo que uno de los métodos que se utiliza es el del Soil Service de los EE.UU. Se inicia con un umbral de escorrentía que a su vez produce la escorrentía superficial determinada con la ecuación 2.7.

$$ESC = [(LLU - P_o) / 2] / [LLU + 4P_o] \quad (2.7)$$

Para la determinación del umbral de escorrentía (P_o) se hace uso de dos constantes y la variable que corresponde al número de curva (NC) representada en la ecuación 2.8.

$$P_o = [508 / NC] - 5.08 \quad (2.8)$$

Por último, se calculó la recarga (R) mediante la ecuación 2.9.

$$R = P - ETR - \text{excedente hídrico} \quad (2.9)$$

Se implementó como herramienta una plantilla de cálculo de Excel para la estimación del Balance Hídrico.

2.3 Metodologías GOD y DRASTIC para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos

Las Figuras 2.7 y 2.8 ilustran dos de los métodos más utilizados en la gestión del agua para determinar la susceptibilidad de los acuíferos a la contaminación: el método GOD y el método DRASTIC.

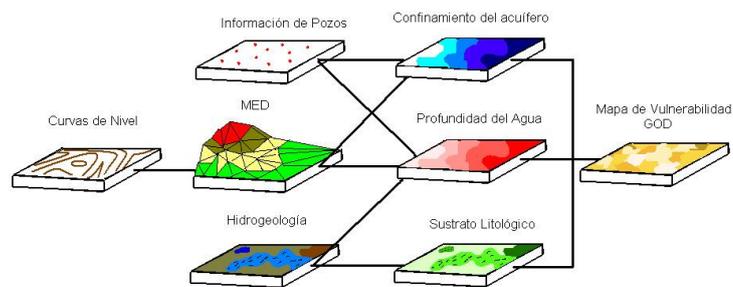


Figura 2.7 Descripción del método GOD

Fuente: Agüero Valverde & Pujol Mesalles (2015)

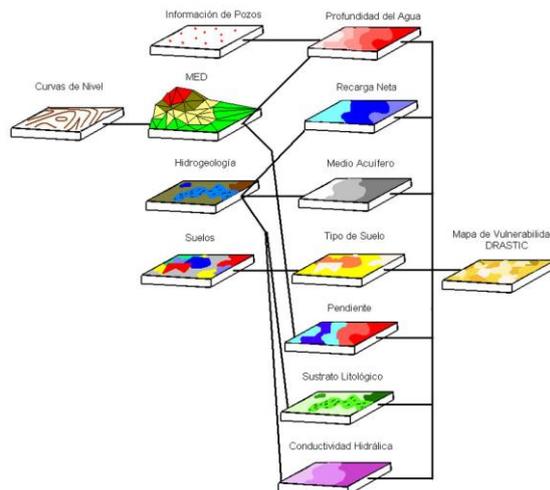


Figura 2.8 Descripción del método DRASTIC

Fuente: Agüero Valverde & Pujol Mesalles (2015)

2.3.1 Método GOD

El método GOD de Foster e Hirata (1988) establece la vulnerabilidad de un acuífero asignando índices entre 0 y 1 a las tres variables principales que componen su nombre:

a) **Grado de confinamiento del acuífero (G):** Con base en la información obtenida de las columnas estratigráficas, la geología y las profundidades del nivel del agua subterránea, se clasificó el área de estudio según la Tabla 2.1 para conocer los tipos de acuíferos.

Tabla 2.1 Condición de confinamiento del acuífero

Tipo de acuífero	Valor
Ninguno	0.0
Surgente	0.0
Confinado	0.2
Semiconfinado	0.4
No confinado (cubierto)	0.6
No confinado	1.0

Fuente: Foster et al. (2003)

b) **Ocurrencia del sustrato suprayacente (O):** Este parámetro se clasificó de acuerdo con la Tabla 2.2. Para ello, se utilizó como información base la litología de la zona, complementada con los datos obtenidos de las muestras tomadas en campo.

Tabla 2.2 Índice del sustrato litológico

No consolidado	Consolidado		Índice
	Roca porosa	Roca no porosa	
Arcillas Lacustres y de estuario			0.4
Suelos residuales			
Limos aluviales, Loess, glacial till	Arcillas, lutitas		0.5
Arenas eólicas	Limolitas, tobas volcánicas	Ígneas/ metamórficas + volcánicas antiguas	0.6
Arenas aluviales y fluvio-glaciares	Areniscas		0.7
Gravas coluviales		Lavas volcánicas recientes	0.8
	Calizas blandas, calcarenitas	Caliche + calizas karstificadas	0.9
		Lavas volcánicas recientes	1
		Caliche + calizas kársticas	

Fuente: Foster et al. (2003)

c) **Distancia al nivel del agua subterránea (D):** Por medio de la piezometría se precisó el nivel freático de la zona de estudio, las cuales fueron clasificadas de acuerdo con la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Índice de la profundidad del nivel de agua subterránea

Profundidad (m)	Índice
> 50	0.6
20 - 50	0.7
5 – 20	0.8
< 5	0.9
Cualquier profundidad (rocas volcánicas recientes y calizas karstificadas)	1

Fuente: Foster et al.(2003)

Para establecer el grado de vulnerabilidad se aplica la siguiente ecuación:

$$Vulnerabilidad = G \times O \times D \quad (2.10)$$

Luego se utilizó la Tabla 2.4 de Foster e Hirata (1988), para caracterizar los acuíferos presentes en el área de estudio precisando los resultados de vulnerabilidad.

Tabla 2.4 Clasificación del nivel de vulnerabilidad del método GOD

Grado de vulnerabilidad	Índice
Despreciable	0 - 0.1
Baja	0.1 - 0.3
Media	0.3 - 0.5
Alta	0.5 - 0.7
Extrema	0.7 - 1.0

Fuente: Foster et al.(2003)

2.3.2 Método DRASTIC

a) **Profundidad del agua subterránea (D):** Los datos de los piezómetros instalados en el área de estudio fueron interpolados y clasificados según la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Valores de profundidad de los niveles piezométricos

Rango de la profundidad del nivel del agua (m)	Valor típico (Dr)
<1.5	10
1.5 - 4.5	9
4.5 - 9	7
9 - 15	5
15 - 23	3
23 - 31	2
>31	1

Fuente: Aller et al.(1987)

b) **Recarga neta del acuífero (R):** Se obtuvo en base al balance hídrico que comprende los parámetros de precipitación, ETR, tipo de suelo, escorrentía e infiltración. Los resultados de la recarga se clasificaron de acuerdo con la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores de la recarga neta al acuífero

Rango de recarga al acuífero (mm)	Valor típico (Rr)
<51	1
51 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
>254	9

Fuente: Aller et al.(1987)

c) **Naturaleza del acuífero (A):** A través de las columnas estratigráficas y el análisis de perforaciones manuales en campo se caracterizó los tipos de rocas que componen el acuífero.

Entonces, se clasificó según la Tabla propuesto por Aller et al. (1987).

Tabla 2.7 Valores del medio acuífero

Naturaleza del acuífero	Rango del valor típico (Ar)	Valor típico (Ar)
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 - 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 - 5	4
Till glacial	4 - 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza masiva	4 - 9	6
Arena o grava	4 - 9	8
Basaltos	2 - 10	9
Caliza kárstica	9 - 10	10

Fuente: Aller et al.(1987)

d) Naturaleza del suelo (S): Para clasificar los tipos de suelos se tomaron muestras de diferentes lugares del área de estudio y se definieron sus texturas mediante análisis granulométricos.

Tabla 2.8 Valores del medio del suelo

Naturaleza del suelo	Valor típico (Sr)
Arcilla no compactada y no agregada	1
Suelo orgánico	2
Arcilla margosa	3
Limo margoso	4
Marga	5
Arenisca margosa	6
Agregado arcilloso o compactado	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Delgado o ausente	10

Fuente: Aller et al.(1987)

- e) **Topografía (T):** Este parámetro se utilizó para evaluar el impacto de la pendiente del terreno en la acumulación del agua superficial. Esto se determinó a partir de un modelo digital del terreno (DEM) obtenido del SNI.

Tabla 2.9 Valores de topografía

Pendiente (%)	Valor típico (Tr)
<2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
>18	1

Fuente: Aller et al.(1987)

- f) **Impacto de la zona vadosa (I):** Se clasificó según la influencia de la zona no saturada situada sobre el acuífero en donde la estratigrafía juega un papel muy importante. La Tabla 2.10 muestra los valores dados según la naturaleza de la zona no saturada que componen la columna estratigráfica.

Tabla 2.10 Valores de la zona vadosa

Naturaleza de la zona no saturada	Rango del valor típico (Ir)	Valor típico (Ir)
Limo/arcilla	1 - 2	1
Lutita	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Intercalación de lutita, arenisca, caliza	4 - 8	6
Arena y grava con limo y arcilla	4 - 8	6
Rocas metamórficas/Ígneas	2 - 8	4
Arena y grava	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza karstificada	8 - 10	10

Fuente: Aller et al.(1987)

g) Conductividad hidráulica (C): Este parámetro se clasificó utilizando la Tabla 2.11, teniendo en cuenta los datos de las columnas estratigráficas de los piezómetros y la geología del área.

Tabla 2.11 Valores de conductividad hidráulica

Rango del valor típico (Cr) (m/d)	Valor típico (Cr)
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: Aller et al.(1987)

El índice de vulnerabilidad DRASTIC se obtuvo como resultado de la suma de los productos de los valores típicos de cada parámetro y sus respectivos pesos (Tabla 2.12), tal como se presenta en la Ecuación 2.5.

$$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = DRASTIC \quad (2.11)$$

Tabla 2.12 Pesos asignados a los parámetros del método DRASTIC

Parámetro (r)	Peso (w)
D	5
R	4
A	3
S	2
T	1
I	5
C	3

Fuente: Aller et al.(1987)

La siguiente tabla muestra la clasificación del nivel de vulnerabilidad del método DRASTIC, utilizadas para crear un mapa final de vulnerabilidad del acuífero.

Tabla 2.13 Clasificación del nivel de vulnerabilidad del método DRASTIC

Clasificación del nivel de vulnerabilidad	Índice DRASTIC
Muy bajo	23 - 64
Bajo	65 - 105
Moderado	106 - 146
Alto	147 - 187
Muy alto	188 - 230

Fuente: Aller et al.(1987)

2.4 Construcción del bloque del modelo hidrogeológico conceptual

Se elaboró a partir de los datos de las diferentes secciones que incluye balance hídrico, geología, litología e hidrogeología. Posteriormente se terminó de modelar en un programa de diseño gratuito.

Para elaborar el modelo conceptual, fue necesario recopilar información teórica y de campo que represente las condiciones y capacidades de infiltración de agua al acuífero, lo cual se detalla a continuación:

- Definir los límites hidrogeológicos y unidades hidrogeológicas (UH).
- Definir la piezometría y parámetros hidrodinámicos del área de estudio.
- Definir tipo de acuífero y porosidad.
- Determinar la geometría de las UH.
- Realizar el balance hídrico.

2.5 Modelo matemático hidrogeológico del área de estudio

El modelo matemático se usó para la simulación de escenarios de recarga de acuíferos que se producen en la zona de interés. Se representó el comportamiento que se definió en el modelo conceptual, considerando las

condiciones iniciales y de contorno. Para la construcción de este modelo se siguió los pasos que se describen a continuación:

- Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.
- Construcción de la malla.
- Ingreso de las condiciones iniciales.
- Definición de las condiciones de contorno.
- Ingresos de parámetros hidrodinámicos.
- Resultados / Calibración.
- Simulación de escenarios / resultados (se simuló con distintos valores de recarga).

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo a la metodología descrita en el capítulo 2, a continuación, se presentan los resultados de la caracterización hidrogeológica y el análisis de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos realizada a la zona de recarga hídrica de la concesión minera Janeth 3.

3.1 Hidrogeología

3.1.1 Suelo

Es un suelo negro con un espesor aproximado de 25 a 50 cm. Compuesto por 29% de gravas, 37% de arenas, 33% de limos y 1% de arcillas, cuya clasificación textural acorde a la FAO (Apéndice Q, p. 62) es franco limoso tal como lo muestra la Figura 3.1.

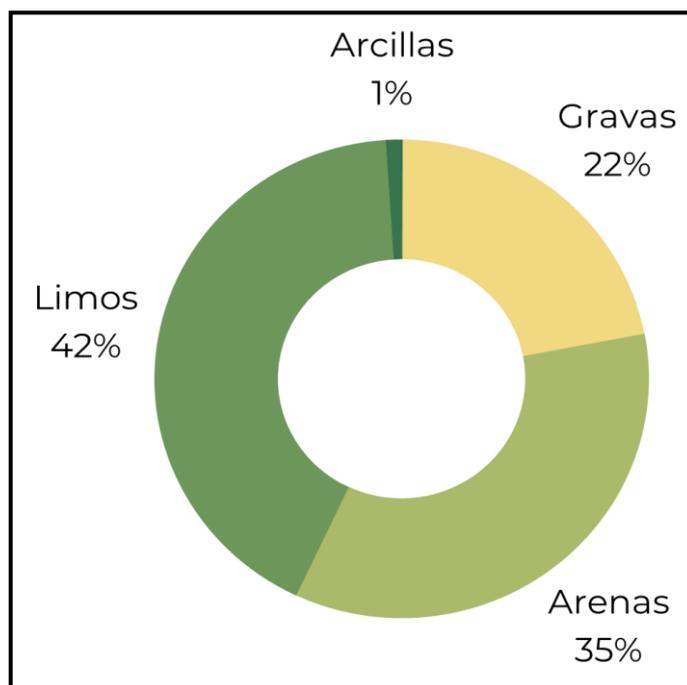


Figura 3.1 Tipo de suelo del área de estudio: franco limoso.

3.1.2 Unidades Hidrogeológicas

El acuífero geológicamente está formado por ignimbritas, composición dacita (principalmente con cristales de sanidinas, cuarzo y en menor proporción plagioclasa), la cual tiene una mineralización secundaria formada por sulfuros, con relleno de fisuras formado por óxidos de hierro, pirita, calcopirita y arcillas. En una matriz de vidrio argilitizado (C, D), también existen clasto de vidrio, cristales de sanidina y albita alterados (D, E), vetillas de cuarzo y óxidos de manganeso. El acuífero tiene porosidad secundaria por la presencia de una ligera a moderada fracturación.

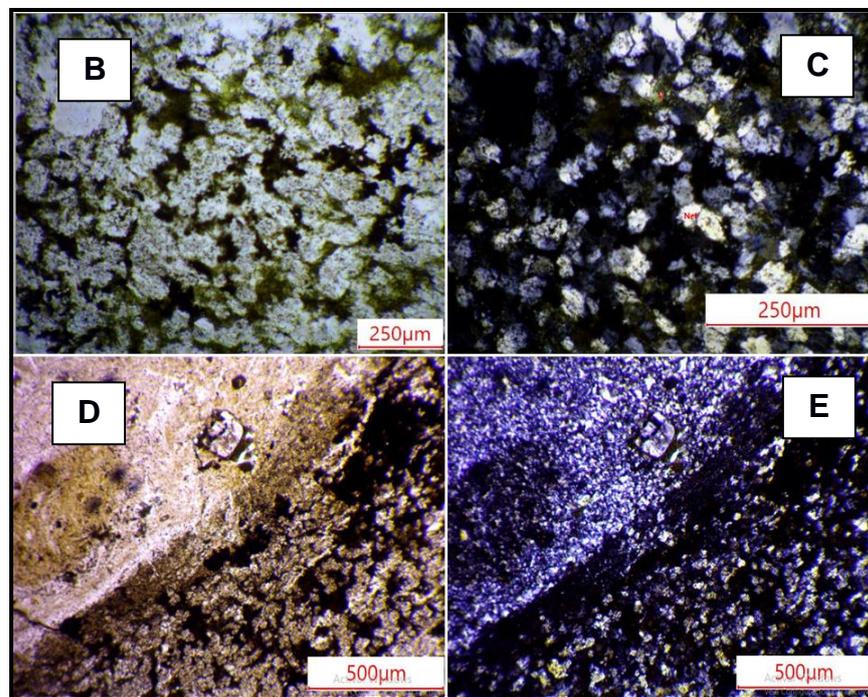


Figura 3.2 B y D. Imagen de microscopio de transmisión en nicoles paralelos. C y E. Imágenes en nicoles cruzados.

En la Tabla 3.1 se describe el comportamiento de las unidades hidrogeológicas encontradas en el área de estudio con base en la información de los piezómetros de monitoreo (RDCPZ21-08, RDCPZ21-09 y RDCPZ21-10) instalados en la empresa.

Tabla 3.1 Identificación de unidades hidrogeológicas

Litología	UH	Tipo de acuífero	Espesor (m)	Permeabilidad (m/d)	Nivel del agua promedio
Gravas, arenas, limos y arcillas	Acuífero	Acuífero muy pobre de porosidad primaria	25 m	1.11E-02 – 5.18E-01	-
Dacita, pórfido y andesita de moderada a altamente fracturada	Acuífero	Acuífero pobre de porosidad secundaria	126 m	5.4E-01 - 1.09E +00	33.16
Dacita, pórfido y andesita ligeramente fracturada	Acuitardo	-	70 m	Menor a 8.64E-02	-

Se identificaron dos unidades hidrogeológicas en el área, las cuales se caracterizaron a partir del análisis de muestras recolectadas durante las actividades de campo. Todo ello, junto con la información litoestratigráfica obtenida de los piezómetros RDCPZ21-08, RDCPZ21-09 y RDCPZ21-10, permitió precisar las características hidrogeológicas del subsuelo de la zona de recarga hídrica.

Las tres capas que componen el subsuelo se identificaron con base en perforaciones realizadas en el sitio, revisión de mapas geológicos, informes y uso de datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP). Una capa de material no consolidado de unos 25 m de espesor, que contiene 20% de gravas, 20% de arenas y 60% de finos, forma un acuífero muy pobre con permeabilidades y

porosidades muy bajas. Seguido de un acuífero pobre con porosidad secundaria, cuyo espesor es de 126 m, compuesto principalmente por rocas de dacita, andesita y pórfidos de cuarzo feldespático, con fracturamiento moderado a alto, y permeabilidad baja que varía en un rango de $5.4E-01$ a $1.09E+00$ m/d. Finalmente, una capa de unos 70 m de espesor forma un acuitardo con baja permeabilidad por debajo de $8,64E-02$ m/d. La profundidad del nivel estático del agua está entre 23.60 a 129.28 m, con un promedio de 33.16 m por todo el corte que pasa por los piezómetros y zona de intersección.

3.1.3 Análisis hidroquímico

Las muestras de agua se recolectaron entre el 25 al 30 de julio de 2022 dentro de las unidades hidrográficas 139568 y 139569 en la parroquia Chaucha. Las muestras fueron preservadas de acuerdo con lo que exige la normativa para el análisis fisicoquímico del agua y trasladadas posteriormente al Laboratorio de Sanitarias de la ESPOL. Donde se determinaron las concentraciones de iones mayoritarios presentes en el agua. Los errores de balance iónico (Apéndice B, p. 47) obtenidos en el laboratorio se encontraron en un rango entre el -4.4 % y 4.0 %, cuyos valores se consideran como aceptables.

En los diagramas de Piper (Figura 3.3) y Stiff (Apéndice C, p. 48) de las muestras en la zona de estudio se observó dos tipos de agua y se aprecia un patrón hidroquímico predominante de las facies bicarbonatado magnésico ($HCO_3^- - Mg^{2+}$) en la formación Tarqui correspondientes a aguas recientes y sulfatado cálcico ($SO_4^{2-} - Ca^{2+}$) debido a cambios en el comportamiento a lo largo de los ríos.

De acuerdo con el libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA): Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluentes Al Recurso Agua, las concentraciones de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , K^+ , Na^+ ,

HCO_3^- determinadas en el laboratorio están por debajo de los límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional.

Las muestras MAFQ (agua superficial tomadas en campo para análisis fisicoquímico), PR (datos fisicoquímicos superficiales recopilados) y los PZ (datos fisicoquímicos subterráneos) mostraron comportamientos similares en los pozos RDCPZ21-08 y RDCPZ21-09, lo cual evidencia la conexión entre el agua superficial y subterránea por efecto de la recarga.

◆ MAFQ-08 ▲ MAFQ-20 ■ MAFQ-21 × PR-02 + PR-03 ● PR-04 ◇ PZ21-02 ▲ PZ21-02A ■ PZ21-03 × PZ21-05

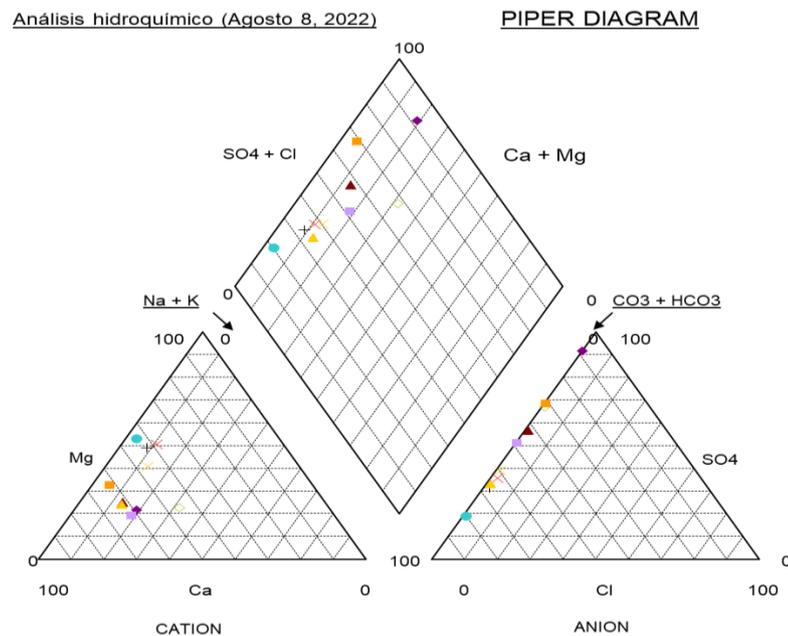


Figura 3.3 Diagrama Piper

3.2 Análisis del balance hídrico

La estación El Labrado registró precipitaciones anuales de 730.30 mm/año en época seca, se obtuvo una tasa de infiltración de 55.26 mm/año, que representa el 7.56% de la precipitación total, con recarga nula del acuífero. Para el escenario húmedo la precipitación anual fue de 1511.40 mm/año, el

balance hídrico muestra una infiltración del 12.59% de la precipitación total y una recarga de 50 mm/año, equivalente a 3.31%. La precipitación en el escenario promedio tiene una tasa de infiltración media anual de 173,36 mm/año, que representa el 14,28% del total, y la recarga es de 50 mm/año, que corresponde el 4,12%.

Tabla 3.2 Valores de infiltración y recarga en la zona de estudio

Escenario	Infiltración (INF)		Recarga (R)	
	(mm)	%	(mm)	%
Seco	55.26	7.56	0	0
Húmedo	190.24	12.59	50	3.31
Promedio	173.36	14.28	50	4.12

En los Apéndices D, E y F se detalla el balance hídrico de los tres escenarios y en el Apéndice K el mapa de recarga neta del acuífero; el cual fue realizado con la ecuación de recarga del método Thornthwaite (Ecuación 2.9).

3.3 Análisis de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos

3.3.1 GOD

De acuerdo con las características hidrogeológicas descritas en la Sección 3.1, se obtuvieron los parámetros de permeabilidad, piezometría y recarga, los cuales fueron importantes para determinar cada uno de los mapas que se muestran en los Apéndices G, H, I. Una vez definido los parámetros necesarios, se aplicó la fórmula de la metodología GOD para generar el mapa de vulnerabilidad final (Figura 3.4). Con este método se determinaron dos grados de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos: “Muy bajo” con un porcentaje de 49.5 % correspondiente a la zona baja del área de estudio en las cuales se encuentran las actividades de exploración avanzada del proyecto Ruta de Cobre y “Bajo” con el 50.5 % dentro de la zona de recarga hídrica y la formación Tarqui.

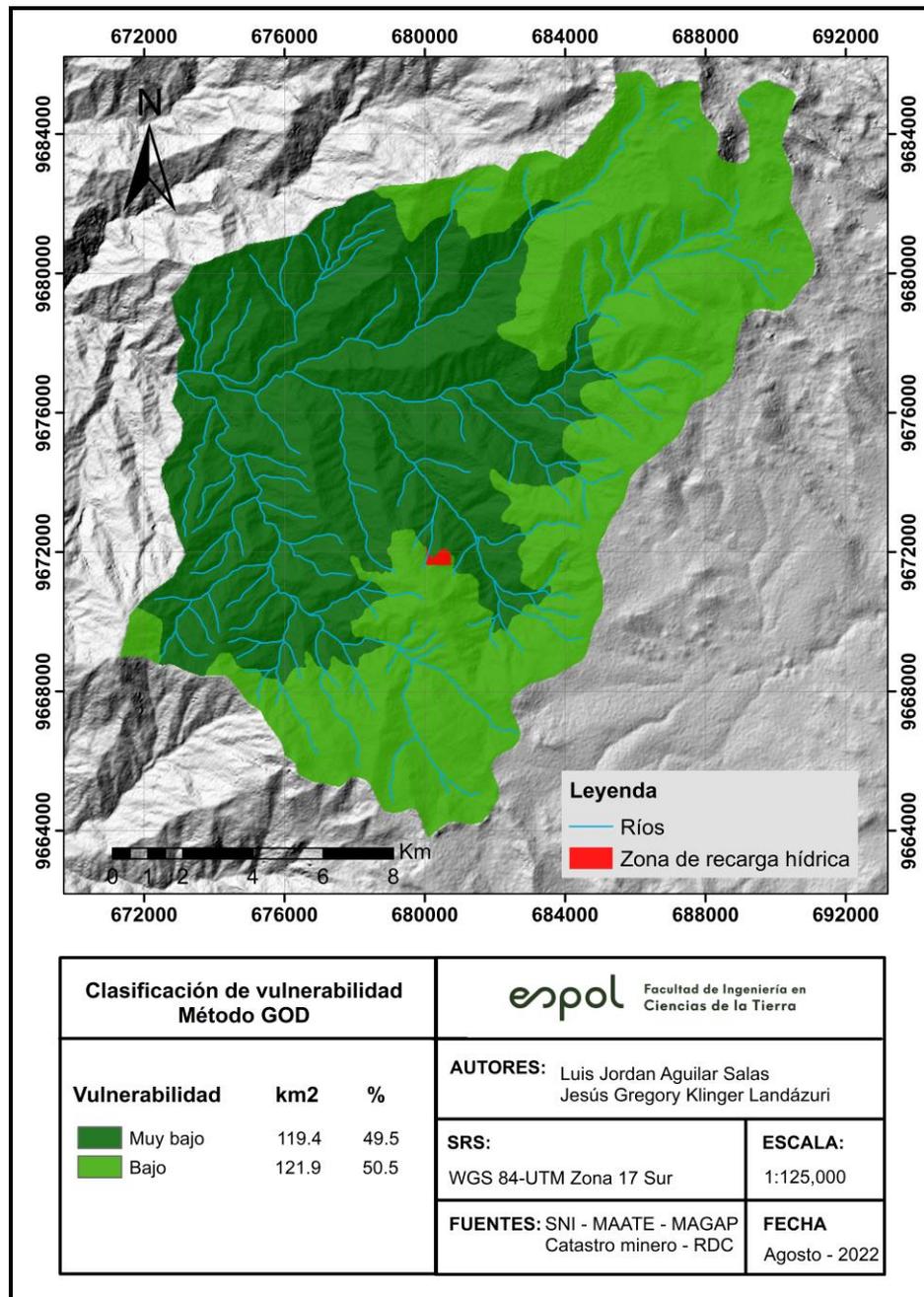


Figura 3.4 Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio, método GOD.

3.3.2 DRASTIC

Una vez obtenidos los parámetros referentes a este método, se generaron los mapas que se muestran en los Apéndices J, K, L, M, N, O, P. Se aplicó la fórmula de la metodología DRASTIC, para generar el mapa de vulnerabilidad final (Figura 3.5).

Con este método se identificaron tres grados de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos: “Muy bajo” con un porcentaje de 31.2% en la parte central del área de estudio, “Bajo” con el 66.3% que abarca un porcentaje mayor y “Moderado” con el 2.5%.

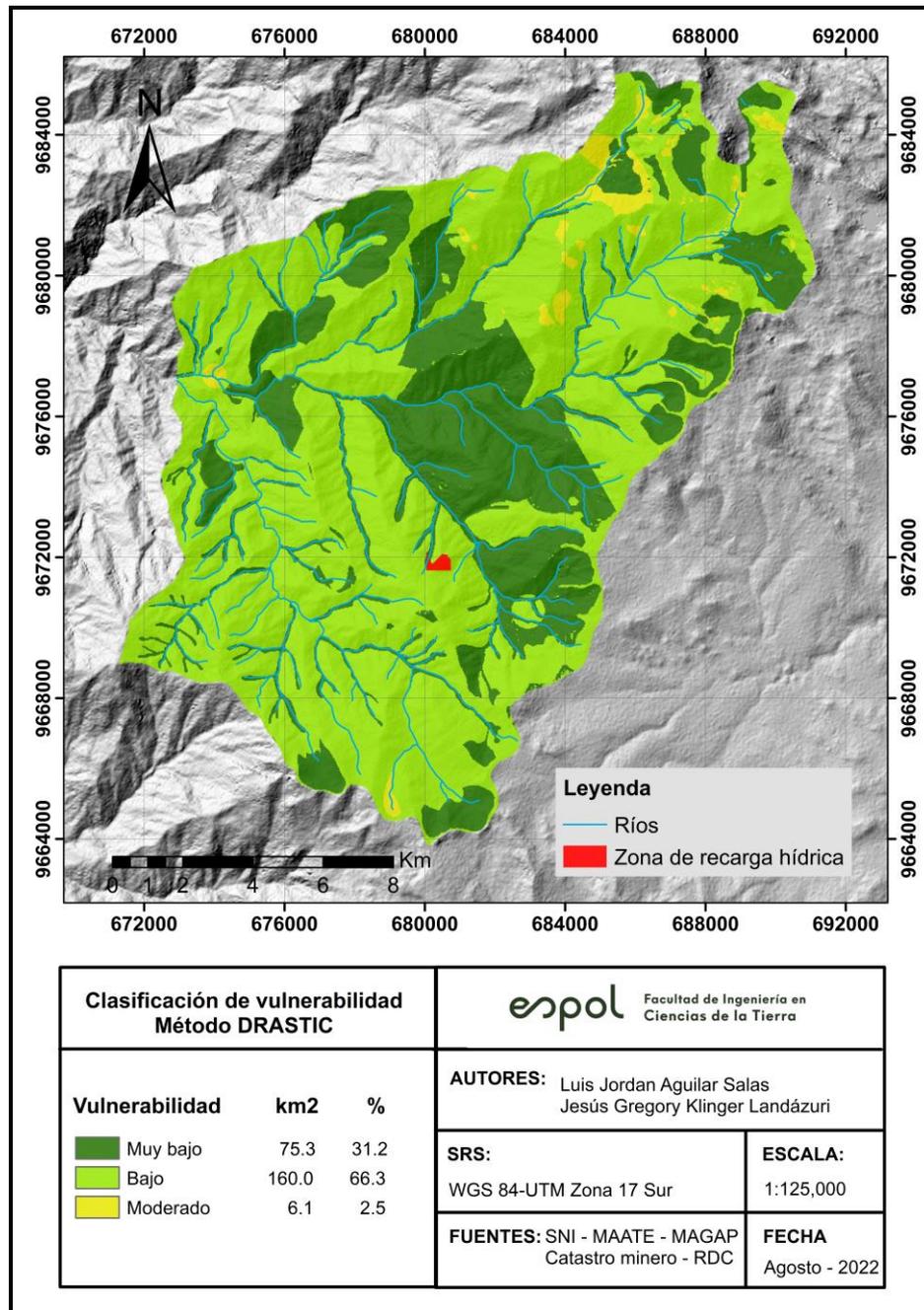


Figura 3.5 Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio, método DRASTIC.

3.4 Análisis del modelo conceptual

Dentro del bloque hidrogeológico conceptual (Figura 3.6), se identificaron dos unidades hidrogeológicas representativas. La formación Tarqui, donde se encuentra la zona de recarga hídrica, presenta porosidad primaria en los niveles cercanos a la superficie y porosidad secundaria a mayor profundidad, por lo cual se considera en general como un acuífero pobre. Por otro lado, la formación Saraguro y áreas compuestas por rocas intrusivas son consideradas como un acuitardo por sus propiedades hidrodinámicas. También se muestran datos de precipitación (1213.80 mm/año), evapotranspiración real (619.07 mm/año), escorrentía (578.9 mm/año), infiltración (173.36 mm/año) y recarga potencial (50 mm/año).

La zona saturada tiene un espesor aproximado de 117.84 m el cual se comporta como un acuífero muy pobre en los primeros metros y pobre a mayor profundidad. Por otro lado, se observa un acuitardo el cual aflora en la superficie en la parte central y noroeste en el área de interés. Los flujos del agua subterránea tienen una dirección predominante hacia el NW y las cabezas hidráulicas dominantes en el área de estudio esta influenciado por el río Angas y quebrada Jerez.

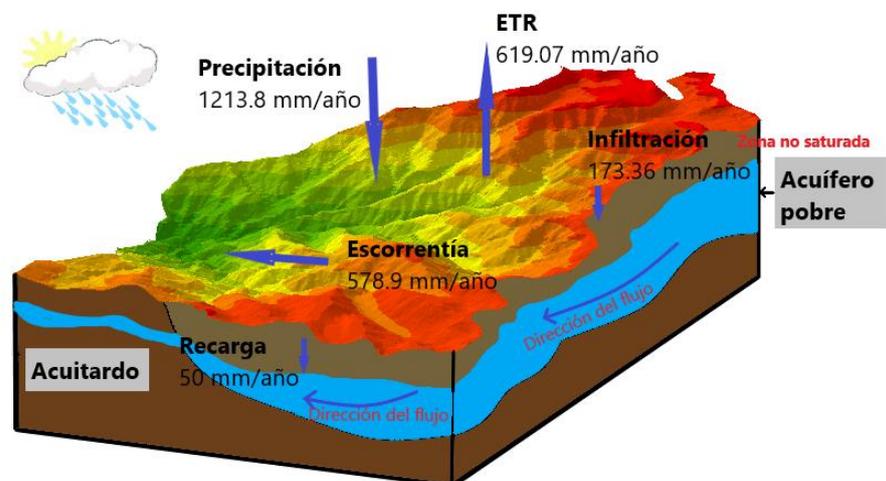


Figura 3.6. Modelo conceptual

3.5 Análisis del modelo numérico

Con el modelo numérico se validó lo establecido en el balance hídrico y modelo conceptual, ya que este permitió calcular los valores de infiltración y recarga bajo los escenarios promedio, seco y húmedo que se muestran en los Apéndices D, E y F. Para los resultados, se estableció dos puntos de referencia en el cambio de piezometría y se generó una simulación de cada escena. El escenario promedio es el punto de partida y en comparación con todos los escenarios, los resultados de piezometría son $4.57 \text{ e}+03$ [m] en el punto 1 (área superior) y $1.78\text{e}+03$ [m] en el punto 2 (área inferior). En el escenario seco con infiltración mínima, el punto 1 tiene un valor de $2,83 \text{ e}+03$ [m] y el punto 2 tiene un valor de $1,48 \text{ e}+03$ [m], lo que indica una disminución en los valores de infiltración y recarga. Finalmente, en la condición húmeda correspondiente a la máxima infiltración, el piezómetro cambia con un valor de $4.96 \text{ e}+03$ [m] en el punto 1 y $1.81 \text{ e}+03$ [m] en el punto 2, donde el valor de la infiltración, lo cual evidencia un aumento de los valores de infiltración y recarga.

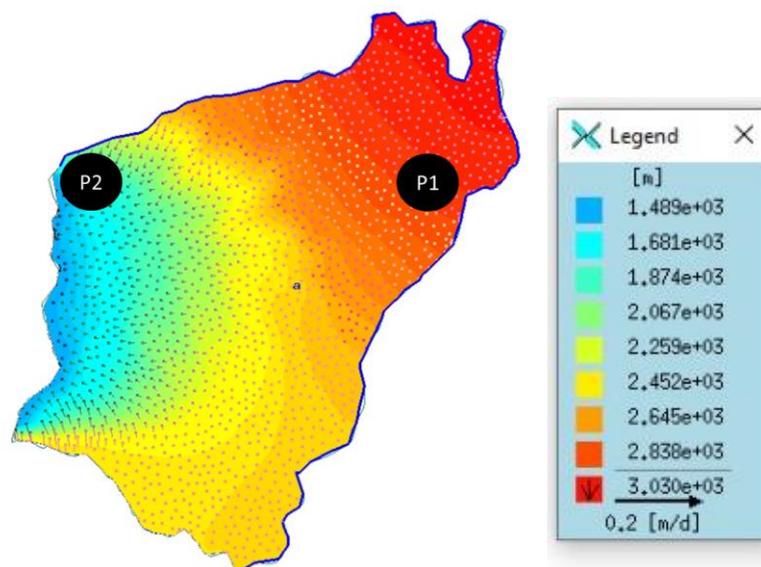


Figura 3.7 Modelo numérico, escenario promedio

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Las metodologías aplicadas coincidieron en que la zona de recarga hídrica de la concesión minera Janeth 3 posee grados de vulnerabilidad que varía entre muy bajo a moderado; en el método GOD, las zonas que presentan “Muy baja” vulnerabilidad a la contaminación (49.5%) corresponden al sector centro y suroeste del área estudiada y las zonas de “Baja” vulnerabilidad (50.52%) se presentan en la formación Tarqui. Por otro lado, en el método DRASTIC los sectores calificados como zonas de “Muy baja” vulnerabilidad representan el 31.2%, mientras que los de “Baja” y “Moderada” vulnerabilidad corresponden al 66.3% y 2.5% respectivamente del área total.
- Las características hidrogeológicas del área de estudio están íntimamente relacionadas con la litología, siendo las zonas compuestas por dacitas, pórfidos y andesitas moderadamente fracturadas con permeabilidad baja, las que ocasionan que este acuífero sea menos vulnerable a la contaminación.
- Tanto el agua superficial y como el agua subterránea son de tipo sulfatada cálcica a bicarbonatada magnésica, y según los datos isotópicos en las zonas cercanas a Janeth 3, se observa, en algunos pozos situados a 3000 msnm, un comportamiento isotópico similar con el agua superficial por efecto de la recarga. La presencia mayoritaria del ion sulfato se debe principalmente a las rocas fracturadas llenas de calcita, pirita, calcopirita y óxidos de hierro en el medio acuífero.

- El balance hídrico en los tres escenarios muestra que los meses con mayor precipitación (diciembre a mayo) son los meses con mayor recarga de acuíferos, sin embargo, esta cantidad no es significativa en comparación con el total de precipitaciones ya que representa solo el 4%, esto es debido a que parámetros como el tipo de suelo, la permeabilidad y la porosidad del sistema acuífero afectan el agua que sale principalmente por escorrentía y evapotranspiración, reduciendo así el riesgo de que los contaminantes lleguen rápidamente al acuífero.
- El modelo hidrogeológico conceptual fue desarrollado en función de las características geológicas, hidrogeológicas y balance de agua de la zona de estudio, de manera que se pueda realizar estimaciones cercanas a la realidad del comportamiento de los acuíferos en la zona de recarga hídrica.
- En el modelo numérico comprobamos la existencia de recarga hídrica en la zona de estudio por medio de los dos puntos de referencia que determinamos como punto 1 (zona alta) y punto 2 (zona baja). Los valores de infiltración de acuerdo con cada escenario, indican que el cambio de piezometría es pequeño y se concluye que la zona donde está el punto 1 es una zona de recarga baja y en el punto 2 la zona de recarga es nula.
- La información presentada en este estudio sirve como referencia para la gestión ambiental y para la protección de las fuentes de agua subterránea en las áreas de influencia de las concesiones mineras, con la finalidad de garantizar una minería responsable y sostenible.

Recomendaciones

- Se recomienda implementar estudios de vulnerabilidad de acuíferos y simulaciones de recarga en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de la concesión minera Janeth 3, para desarrollar planes de manejo de recursos

hídricos en áreas donde se ubicarán los depósitos de residuos como relaveras y escombreras.

- Al comenzar la elaboración de mapas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), se recomienda definir la escala en la que representará la información en función de los objetivos de la investigación y las características del área de estudio, ya que esto permitirá obtener más detalles y reflejar mejor la realidad.
- Se debe incorporar un plan de monitoreo de agua de los acuíferos para mantener su calidad y evitar la contaminación. Además, es importante organizar capacitaciones a las personas sobre el uso consciente de este valioso recurso, a fin de establecer un compromiso de gestión integrada de los recursos hídricos entre la comunidad y el sector privado.
- Se recomienda realizar pruebas de permeabilidad por tramos en cada piezómetro instalado para determinar con mayor detalle las unidades hidrogeológicas existentes en la zona.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

- Custodio Gimena, E., & Llamas Madurga, M. (1983). Formaciones geológicas como acuíferos. In *Hidrología Subterránea* (2nd ed., p. 260). Ediciones Omega, S. A.
- Fernández, C. de M. (2012). *Hidrogelología aplicada con aspectos ambientales* (Y. M. Jimenez (ed.); p. 343,344). Editorial Digital Universitaria de Moa. <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1639>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Aquifers and aquitards. In *Groundwater* (p. 47). Prentice-Hall, Inc.

Artículo presentado a una conferencia

- Agüero Valverde, J., & Pujol Mesalles, R. (2015). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. *VII Confrencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI/Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía. 20-22 Setiembre, 2000.*

Libro en línea

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.*
- Auge, M. (2007). Vulnerabilidad de acuíferos. In *Servicio Geológico Minero Argentino.* [https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2494/Texto Vulnerabilidad de Acuíferos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2494/Texto%20Vulnerabilidad%20de%20Acuíferos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ouakili, Z., & Chipppo, H. (2012). *Aquifers: Types, impacts and conservation.* Nova Science Publishers, Inc.

Artículos de revista tomados de Internet

- Alulema Del Salto, R., & López Vera, S. (2016). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la unidad hidrogeológica Huaquillas. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 2(Método GOD), 78–79. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.892>

- Díaz, J. E., Rivera, C. L., & Figueroa, J. A. (2013). Estudio de Vulnerabilidad a la Contaminación de un Acuífero en el Municipio de Yumbo, Valle del Cauca. *10*, 17.
- Estupiñan, R., Romero, P., García, M., Garcés, D., & Valverde, P. (2021). Mining in Ecuador. Past, present and future. *Boletín Geológico y Minero*, *132*(4), 533–549. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.4.010>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2003). Protección de la Calidad del Agua Subterránea. In *Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/ Banco Mundial*. www.worldbank.org
- Khelif, N., Jmal, I., & Bouri, S. (2016). Mapping global vulnerability index in mining sectors: A case study Moulares-Redayef aquifer system, southwestern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, *121*, 108–118. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2016.05.028>
- Llor Bruno, Á. C., Carrión Rodríguez, R. A., & Mantilla Campana, G. V. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde. *Revista Universidad y Sociedad*, 395–401. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202019000200395&script=sci_arttext&tlng=en
- Lv, X., Xiao, W., Zhao, Y., Zhang, W., Li, S., & Sun, H. (2019). Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China. *Ecological Indicators*, *106*, 105475. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2019.105475>
- Ofori, G., & Sarpong, D. (2022). Beyond the doom: Sustainable water management practices of small-scale mining operations. *Resources Policy*, *77*, 102649. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2022.102649>
- Ribeiro, L., Pindo, J. C., & Dominguez-Granda, L. (2017). Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*, *574*, 1674–1683. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.09.004>
- Saenz, C. (2022). Keeping up with the flow: Using multiple water strategies to earn social license to operate in the Peruvian mining industry. *Resources Policy*, *77*, 102687. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2022.102687>

Tesis

Campoverde Muñoz, P. A. (2021). *Evaluación del riesgo a la contaminación de acuíferos en las cunecas de los ríos Gala, Tenguel y Siete del distrito minero de Ponce Enríquez*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Ruiz, D. A., & Martínez, G. S. (2015). *Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos presentes en el área del municipio de Ambalema, departamento del Tolima, Colombia*. Universidad Católica de Colombia.

Reportes

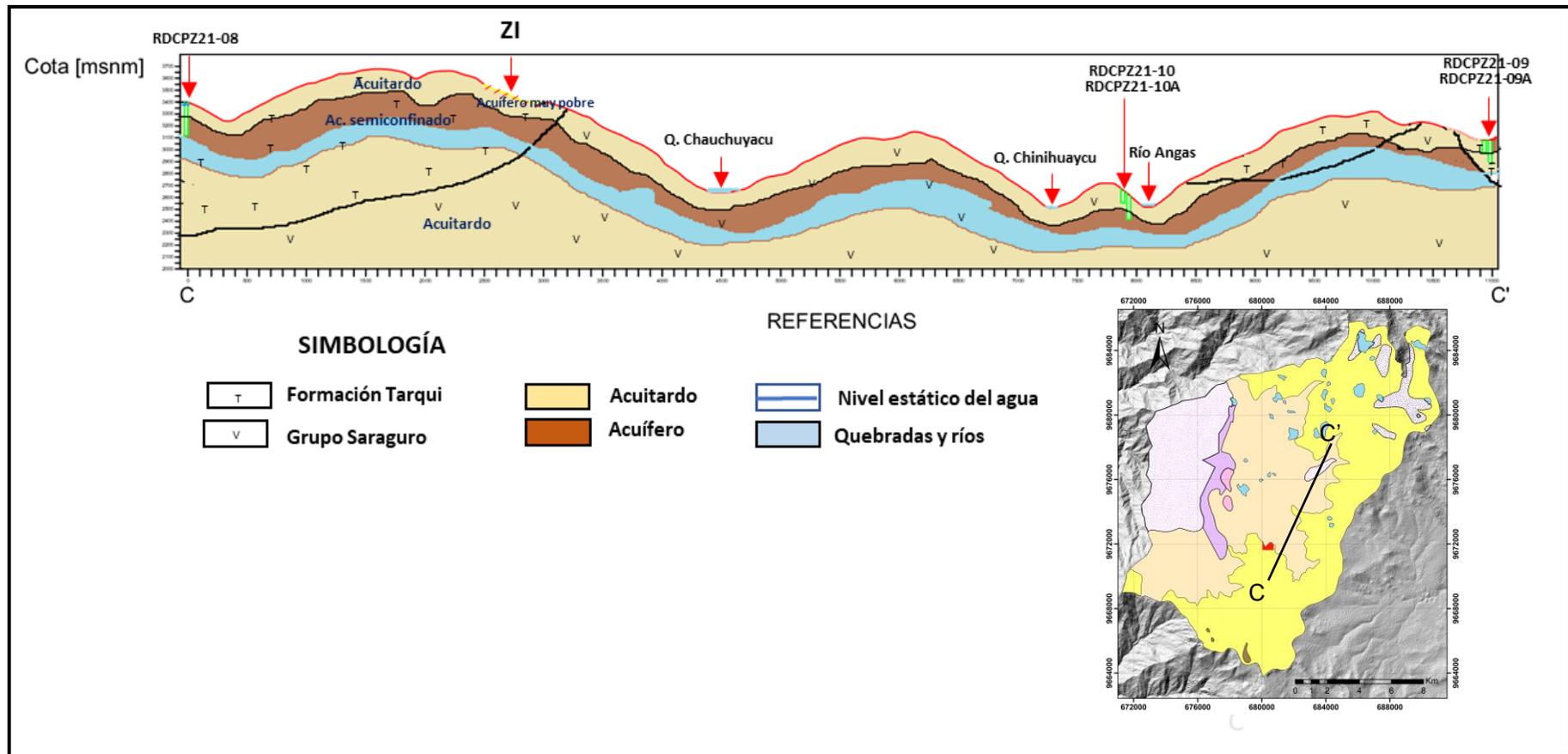
Huaco, J. G. (2021). *Memoria descriptiva de la geología regional en la zona de chaucha proyecto "Ruta de cobre."*

SRK Consulting (Perú) S.A. (2022). *Informe de perforación e instalación de piezómetros (Issue 002)*.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Perfil Hidrogeológico C-C' – Rumbo S-E



APÉNDICE B

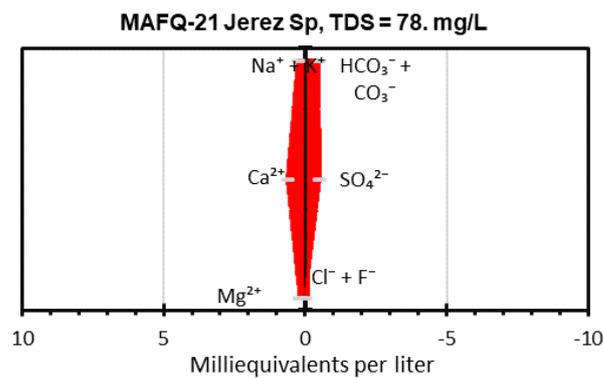
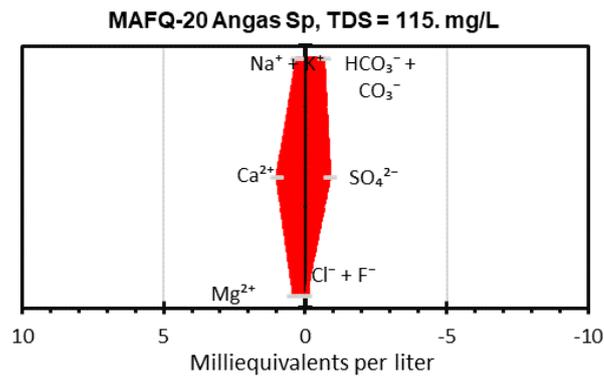
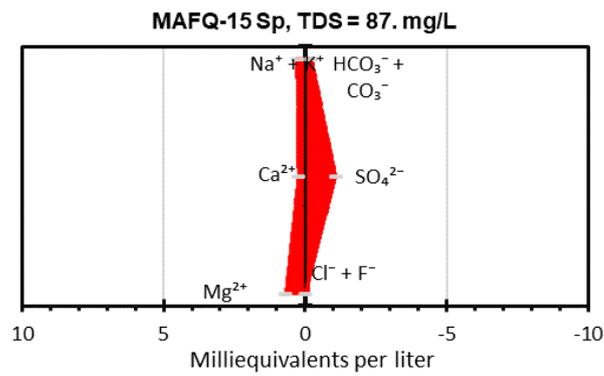
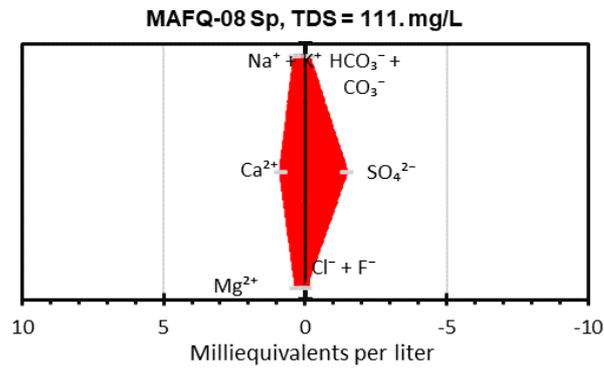
Balance iónico de las cuatro muestras de agua recolectadas

Muestra	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cationes				Suma cationes	Aniones				Suma aniones	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	Error del balance iónico
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺		SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻			
		(mEq/L)	(mEq/L)	(mEq/L)	(mEq/L)		(mEq/L)	(mEq/L)	(mEq/L)	(mEq/L)			
MAFQ-08	179.0	0.880	0.320	0.102	0.280	1.580	1.479	0.003	0.008	0.131	1.623	60	-1.3
MAFQ-15	153.9	0.240	0.680	0.077	0.220	1.220	1.083	0.003	0.011	0.230	1.329	46	-4.4
MAFQ-20	137.6	1.000	0.400	0.077	0.211	1.690	0.875	0.017	0.010	0.656	1.559	70	4.0
MAFQ-21	101.7	0.640	0.200	0.077	0.187	1.100	0.521	0.003	0.008	0.492	1.025	42	3.7

*Método de medición: Titulación con reactivos HACH (Ca²⁺, Mg²⁺); Espectrofotometría HACH en equipo DR 3900 (SO₄⁻², Cl⁻, NO₃⁻, K⁺); Potenciometría (electrodo multiparamétrica) (Na⁺); Titulación con ácido sulfúrico (HCO₃⁻).

APÉNDICE C

Diagramas Stiff de las cuatro muestras recolectadas



APÉNDICE D

Balance hídrico escenario seco método Thornthwaite estación El Labrado

PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	P [mm]	ETP [mm]	Reserva [mm]	ETR [mm]	Déficit [mm]	Excedente [mm]	Recarga [mm]	Precipitación útil [mm]	Escorrentía [mm]	Infiltración [mm]
OCTUBRE	52.70	47.60	26.00	47.60	0.00	0.00	5.10	5.10	0.21	4.89
NOVIEMBRE	40.70	42.40	24.30	42.40	0.00	0.00	-1.70	-1.70	2.16	-3.86
DICIEMBRE	50.30	40.40	34.20	40.40	0.00	0.00	9.90	9.90	2.03	7.88
ENERO	53.30	41.20	50.00	41.20	0.00	3.30	8.80	12.10	3.24	8.86
FEBRERO	64.90	41.00	50.00	41.00	0.00	23.90	0.00	23.90	11.80	12.10
MARZO	94.20	50.50	50.00	50.50	0.00	43.70	0.00	43.70	29.21	14.49
ABRIL	102.00	54.10	50.00	54.10	0.00	47.90	0.00	47.90	33.10	14.80
MAYO	81.70	59.30	50.00	59.30	0.00	22.40	0.00	22.40	10.59	11.81
JUNIO	68.20	54.60	50.00	54.60	0.00	13.60	0.00	13.60	4.17	9.43
JULIO	56.10	52.10	50.00	52.10	0.00	4.00	0.00	4.00	0.04	3.96
AGOSTO	37.00	49.10	37.90	49.10	0.00	0.00	-12.10	-12.10	0.00	-12.10
SEPTIEMBRE	29.60	46.60	20.90	46.60	0.00	0.00	-17.00	-17.00	0.00	-17.00
TOTAL, ANUAL	730.70	578.90		578.90	0.00	158.80	-7.00	151.80	96.54	55.26

APÉNDICE E

Balance hídrico escenario húmedo método Thornthwaite estación El Labrado

PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	P [mm]	ETP [mm]	Reserva [mm]	ETR [mm]	Déficit [mm]	Excedente [mm]	Recarga [mm]	Precipitación útil [mm]	Escorrentía [mm]	Infiltración [mm]
OCTUBRE	120.80	47.60	50.00	47.60	0.00	73.20	0.00	73.20	57.19	16.01
NOVIEMBRE	125.60	42.40	50.00	42.40	0.00	83.20	0.00	83.20	66.89	16.31
DICIEMBRE	110.60	40.40	50.00	40.40	0.00	70.20	0.00	70.20	70.20	15.90
ENERO	122.30	41.20	50.00	41.20	0.00	31.10	50.00	81.10	54.30	16.25
FEBRERO	162.30	41.00	50.00	41.00	0.00	121.30	0.00	121.30	104.25	17.05
MARZO	163.20	50.50	50.00	50.50	0.00	112.70	0.00	112.70	95.78	16.92
ABRIL	176.70	54.10	50.00	54.10	0.00	122.60	0.00	122.60	105.53	17.07
MAYO	138.90	59.30	50.00	59.30	0.00	79.60	0.00	79.60	63.39	16.21
JUNIO	111.60	54.60	50.00	54.60	0.00	57.00	0.00	57.00	41.66	15.34
JULIO	107.70	52.10	50.00	52.10	0.00	55.60	0.00	55.60	40.34	15.26
AGOSTO	82.80	49.10	50.00	49.10	0.00	33.70	0.00	33.70	20.16	13.54
SEPTIEMBRE	88.90	46.60	50.00	46.60	0.00	42.30	0.00	42.30	27.92	14.38
TOTAL, ANUAL	1511.40	578.90		578.90	00.00	882.5	50.00	932.50	742.26	190.24

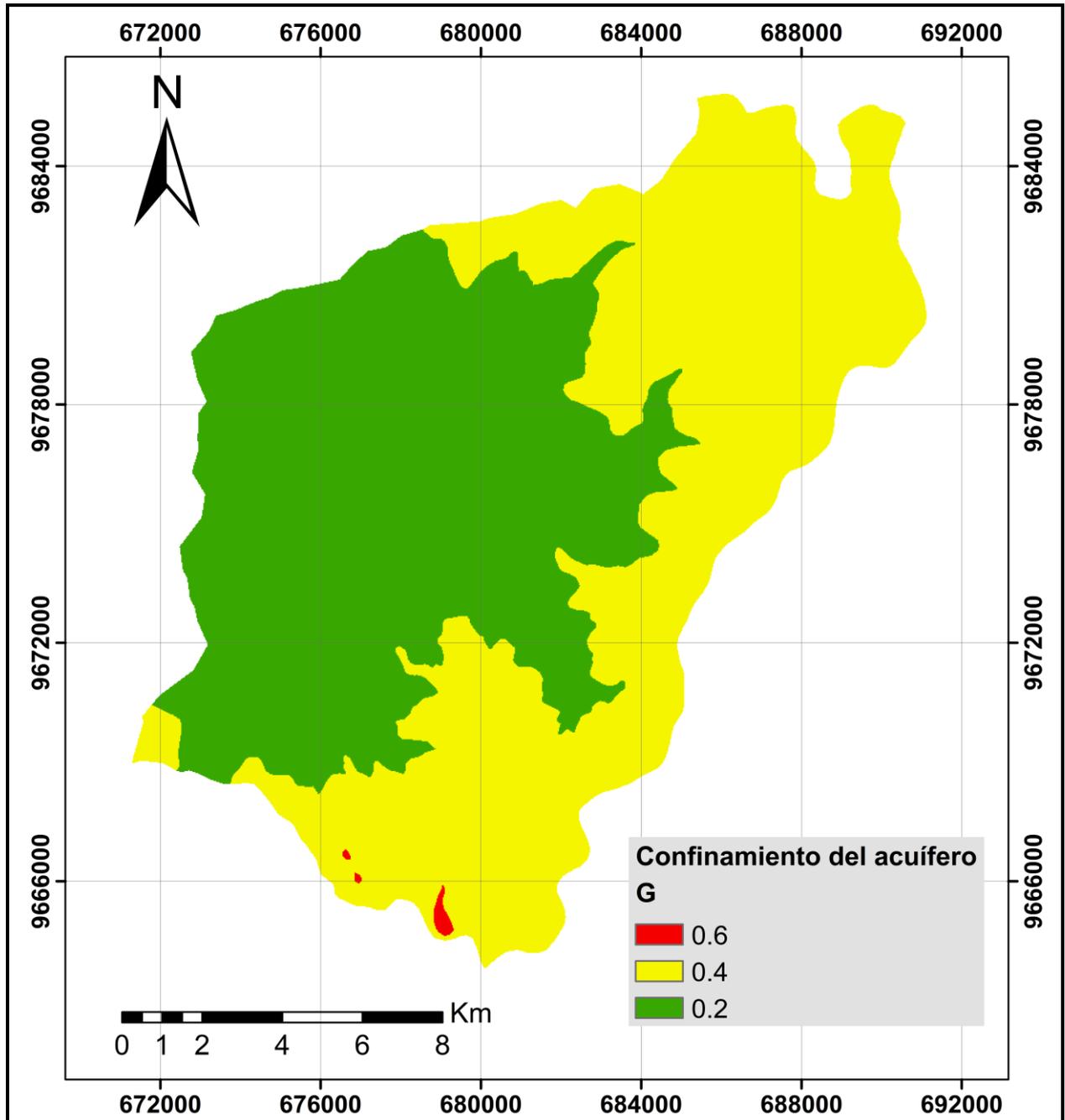
APÉNDICE F

Balance hídrico escenario promedio método Thornthwaite estación El Labrado

PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	P [mm]	ETP [mm]	Reserva [mm]	ETR [mm]	Déficit [mm]	Excedente [mm]	Recarga [mm]	Precipitación útil [mm]	Escorrentía [mm]	Infiltración [mm]
OCTUBRE	91.10	47.60	50.00	47.60	0.00	43.50	0.00	43.50	29.02	14.48
NOVIEMBRE	99.30	42.40	50.00	42.40	0.00	56.90	0.00	56.90	41.57	15.33
DICIEMBRE	96.40	40.40	50.00	40.40	0.00	56.00	0.00	56.00	40.72	15.28
ENERO	93.90	41.20	50.00	41.20	0.00	2.70	50.00	52.70	37.60	15.10
FEBRERO	111.10	41.00	50.00	41.00	0.00	70.10	0.00	70.10	54.20	15.90
MARZO	139.90	50.50	50.00	50.50	0.00	89.40	0.00	89.40	72.93	16.47
ABRIL	143.80	54.10	50.00	54.10	0.00	89.70	0.00	89.70	73.22	16.48
MAYO	121.30	59.30	50.00	59.30	0.00	62.00	0.00	62.00	46.43	15.57
JUNIO	100.80	54.60	50.00	54.60	0.00	46.20	0.00	46.20	31.52	14.68
JULIO	87.10	52.10	50.00	52.10	0.00	35.00	0.00	35.00	21.31	13.69
AGOSTO	60.30	49.10	50.00	49.10	0.00	11.80	0.00	11.80	3.07	8.73
SEPTIEMBRE	68.20	46.60	50.00	46.60	0.00	21.60	0.00	21.60	9.95	11.65
TOTAL, ANUAL	1213.20	578.90		578.90	0.00	584.90	50.00	634.90	461.54	173.36

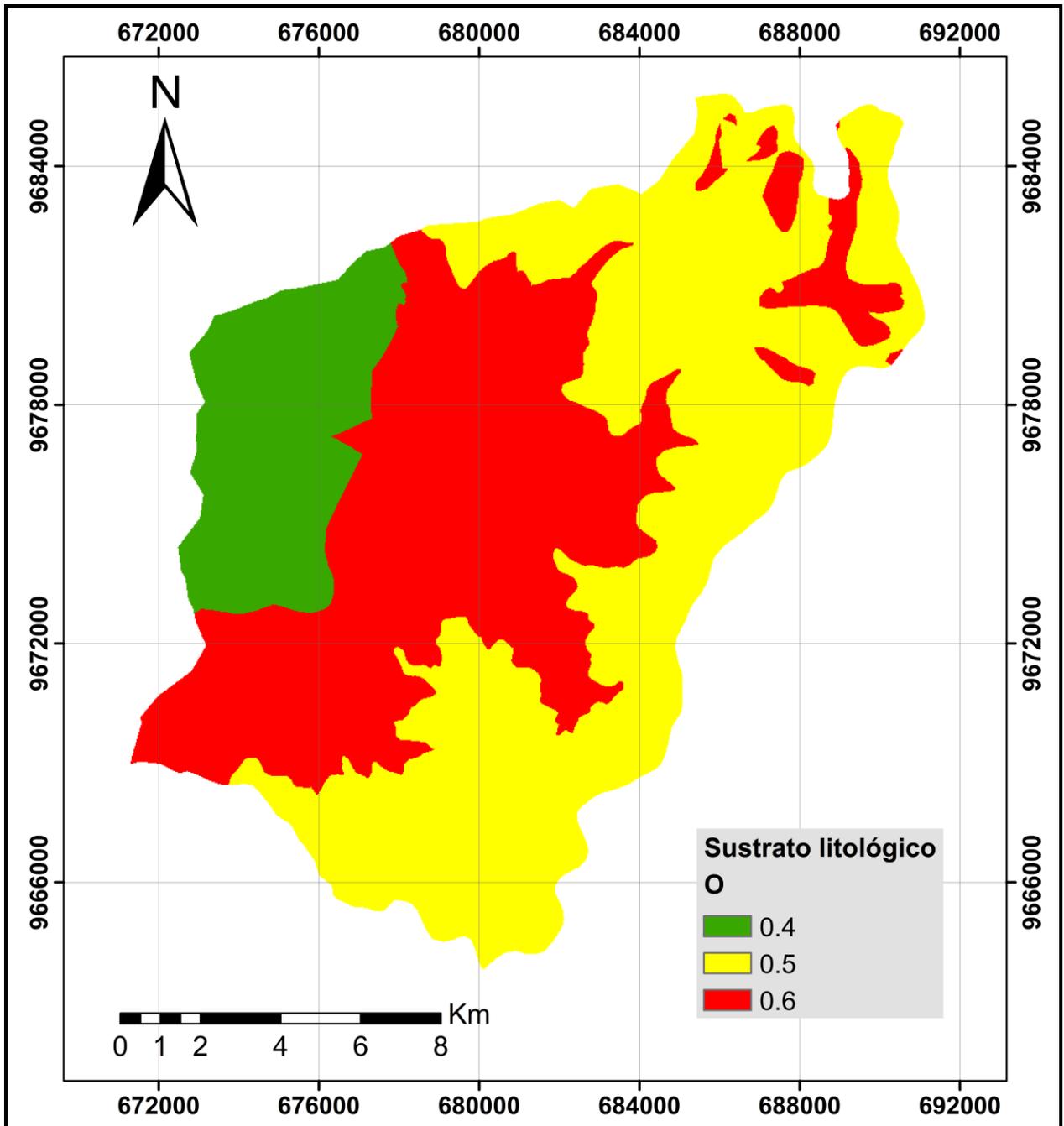
APÉNDICE G

Parámetro G – Método GOD



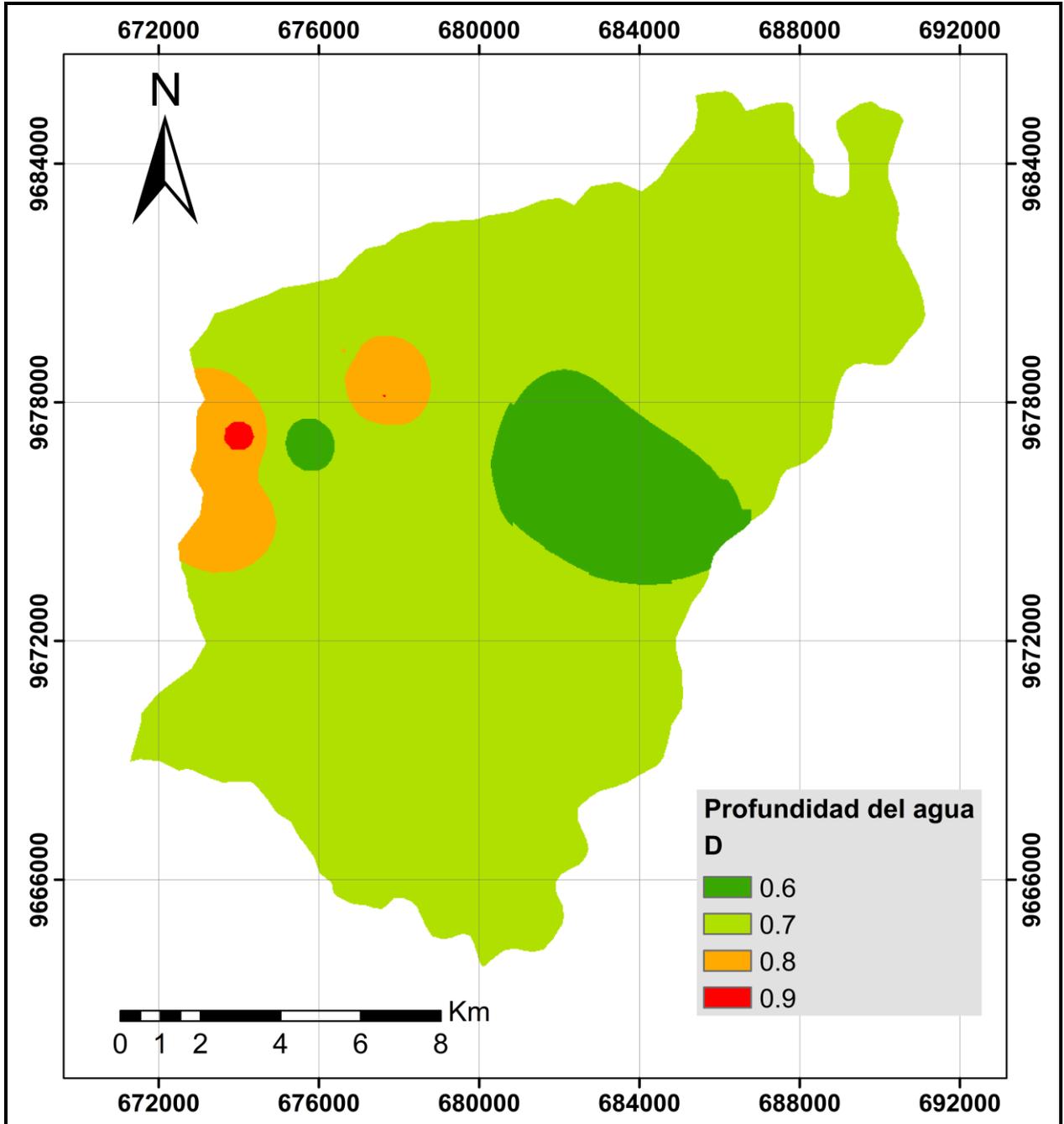
APÉNDICE H

Parámetro O - Método GOD



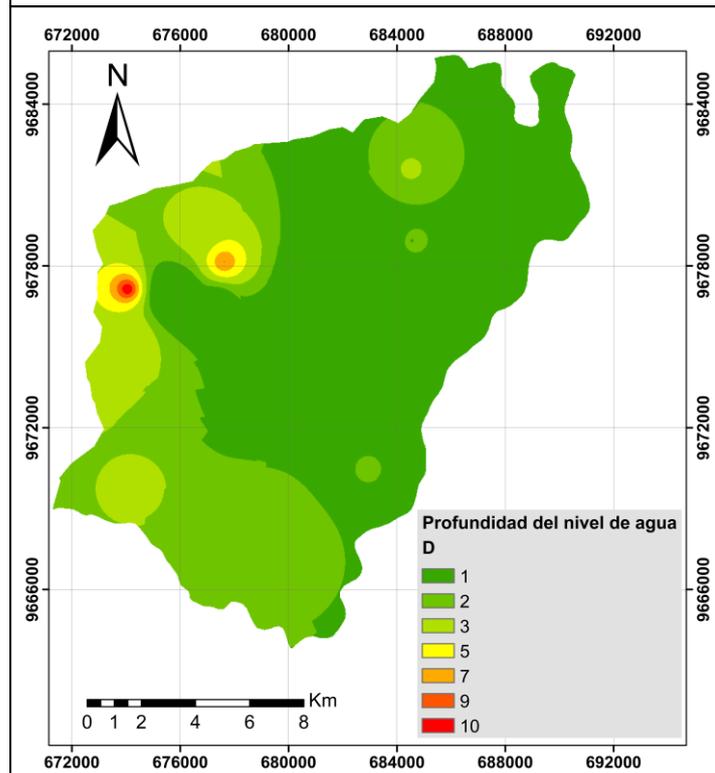
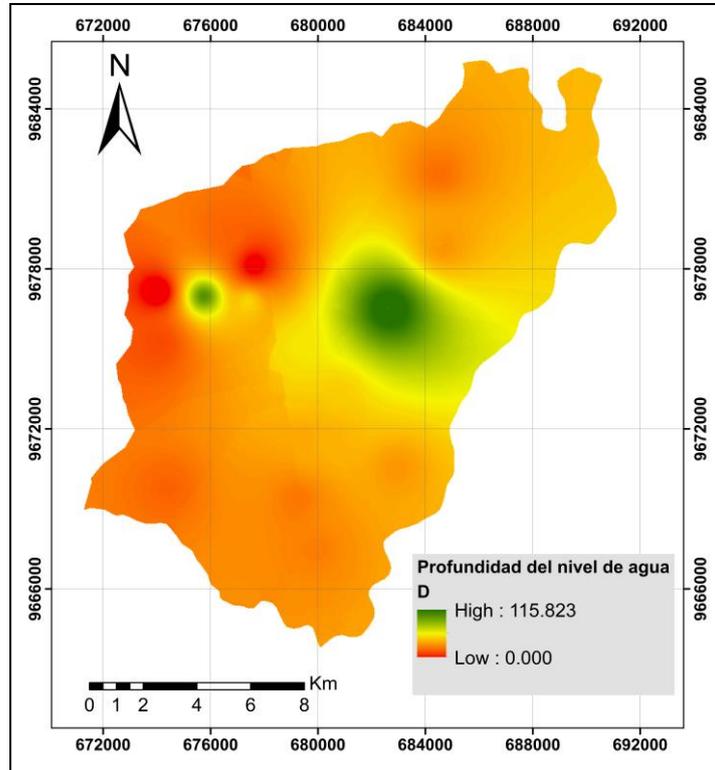
APÉNDICE I

Parámetro D - Método GOD



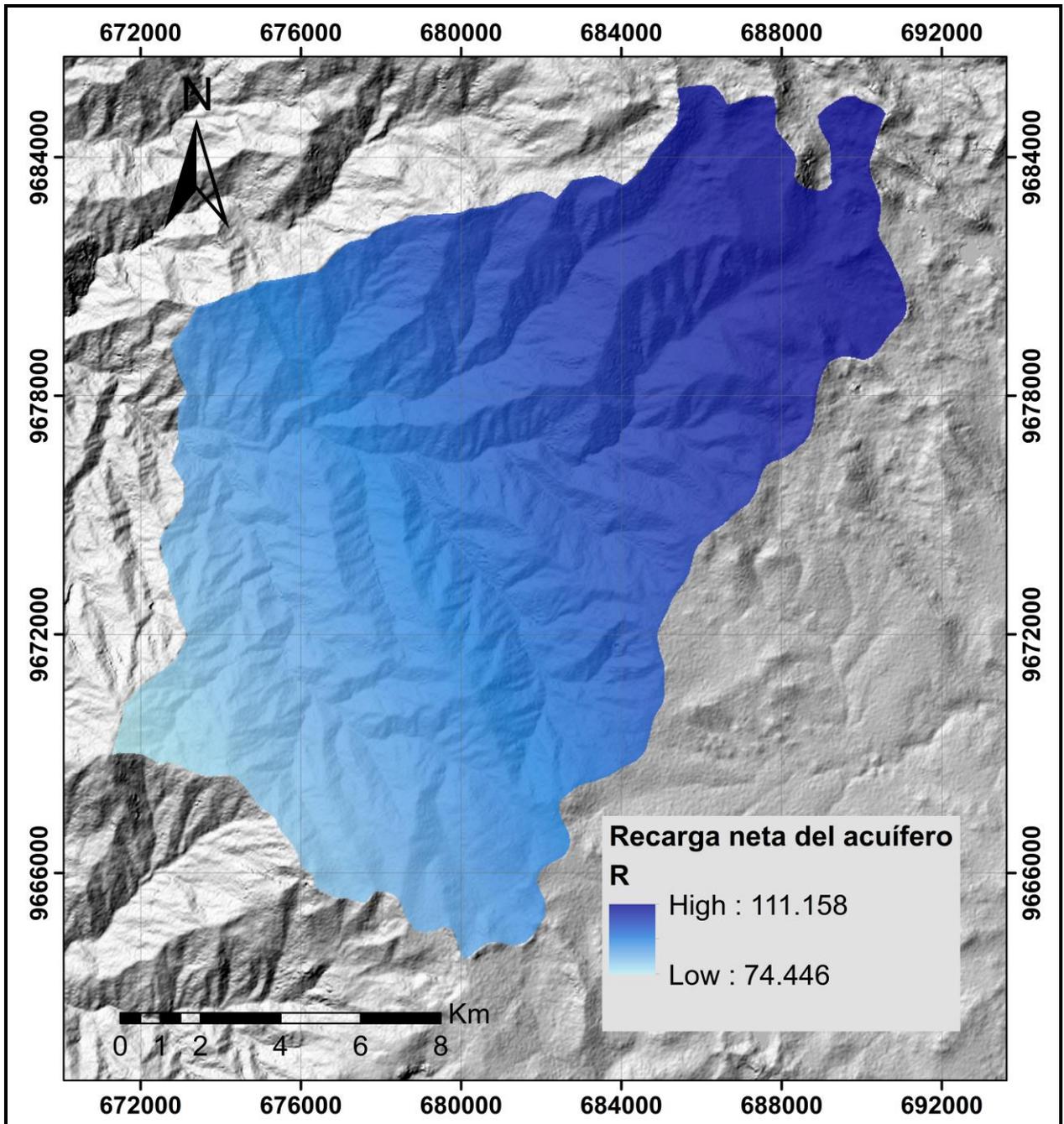
APÉNDICE J

Parámetro D – Método DRASTIC



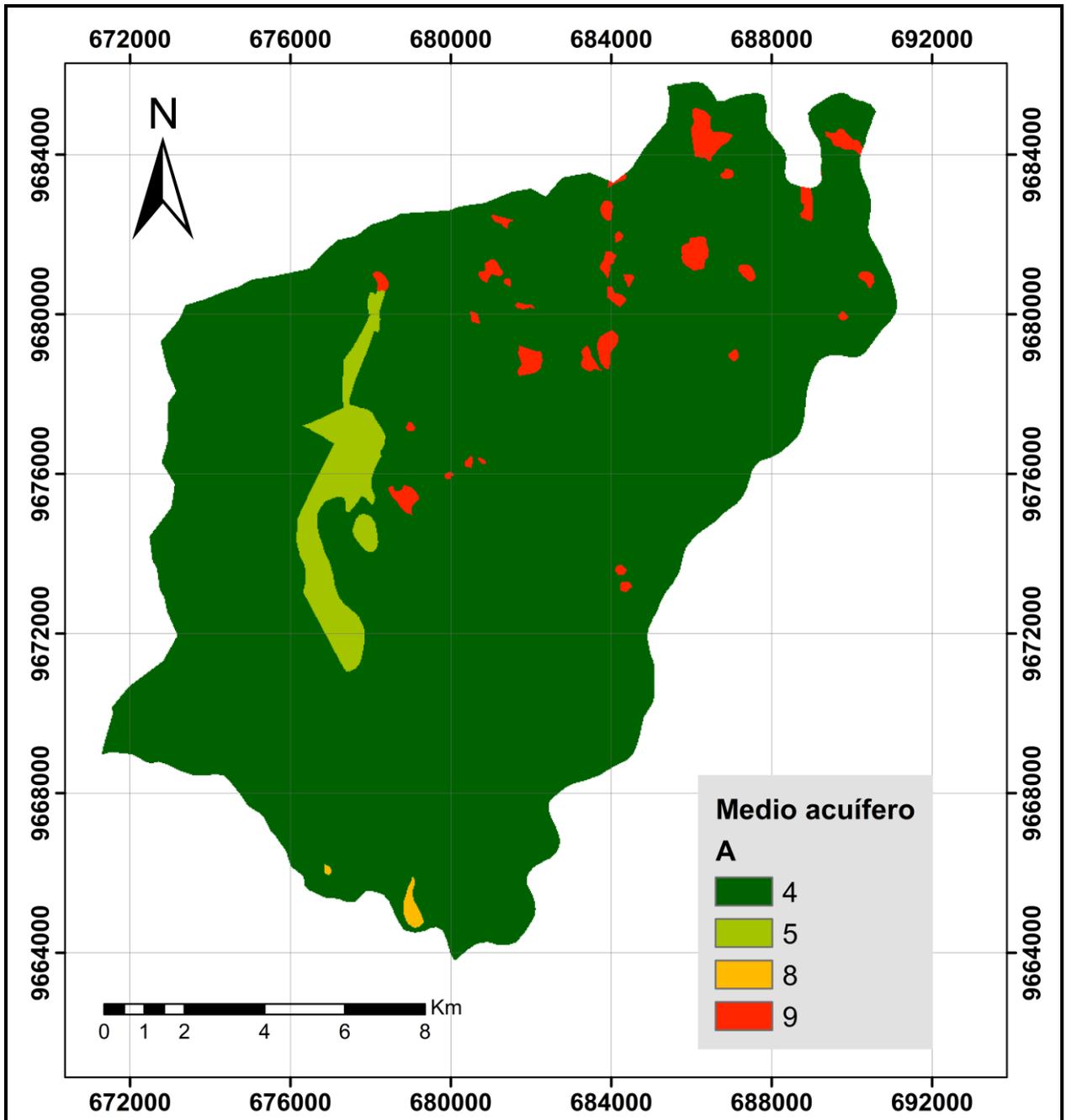
APÉNDICE K

Parámetro R – Método DRASTIC



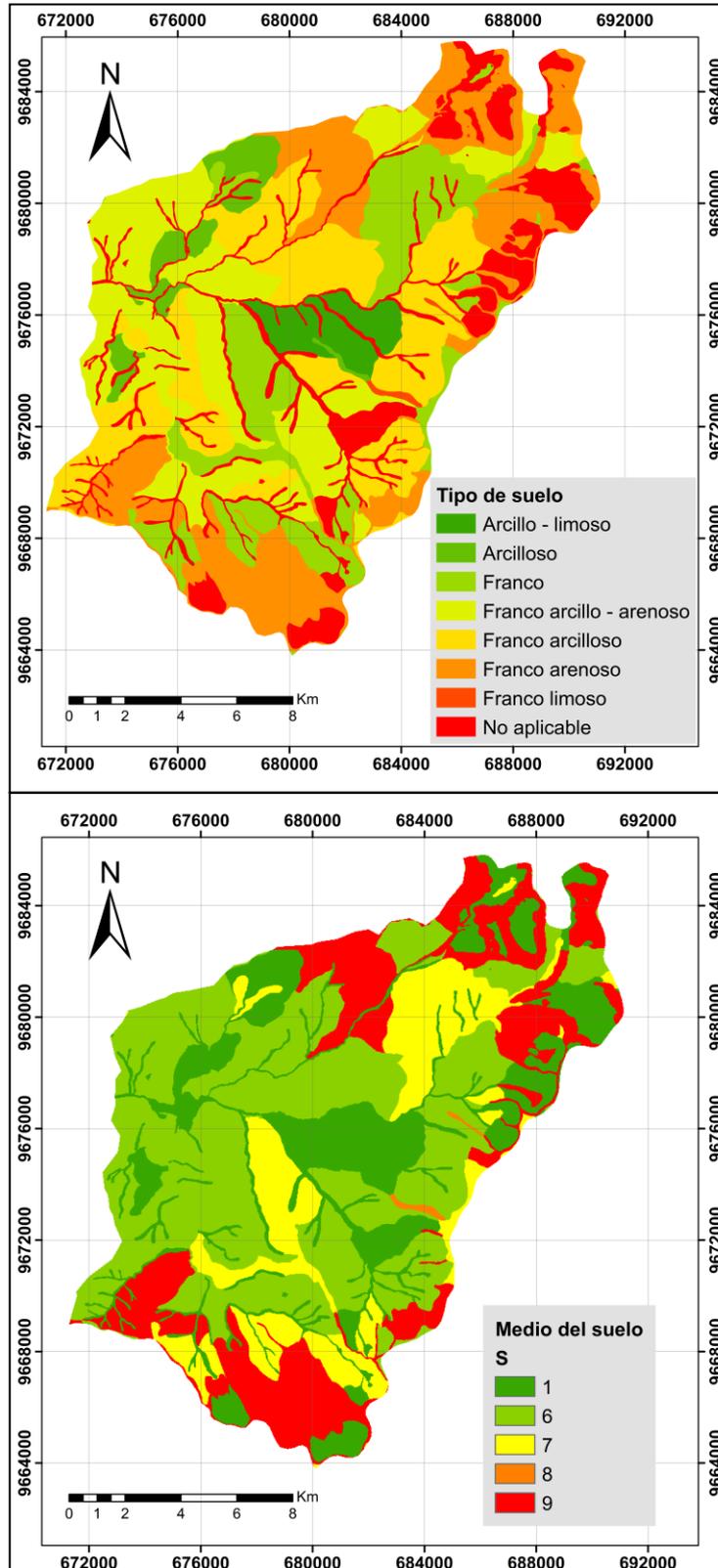
APÉNDICE L

Parámetro A – Método DRASTIC



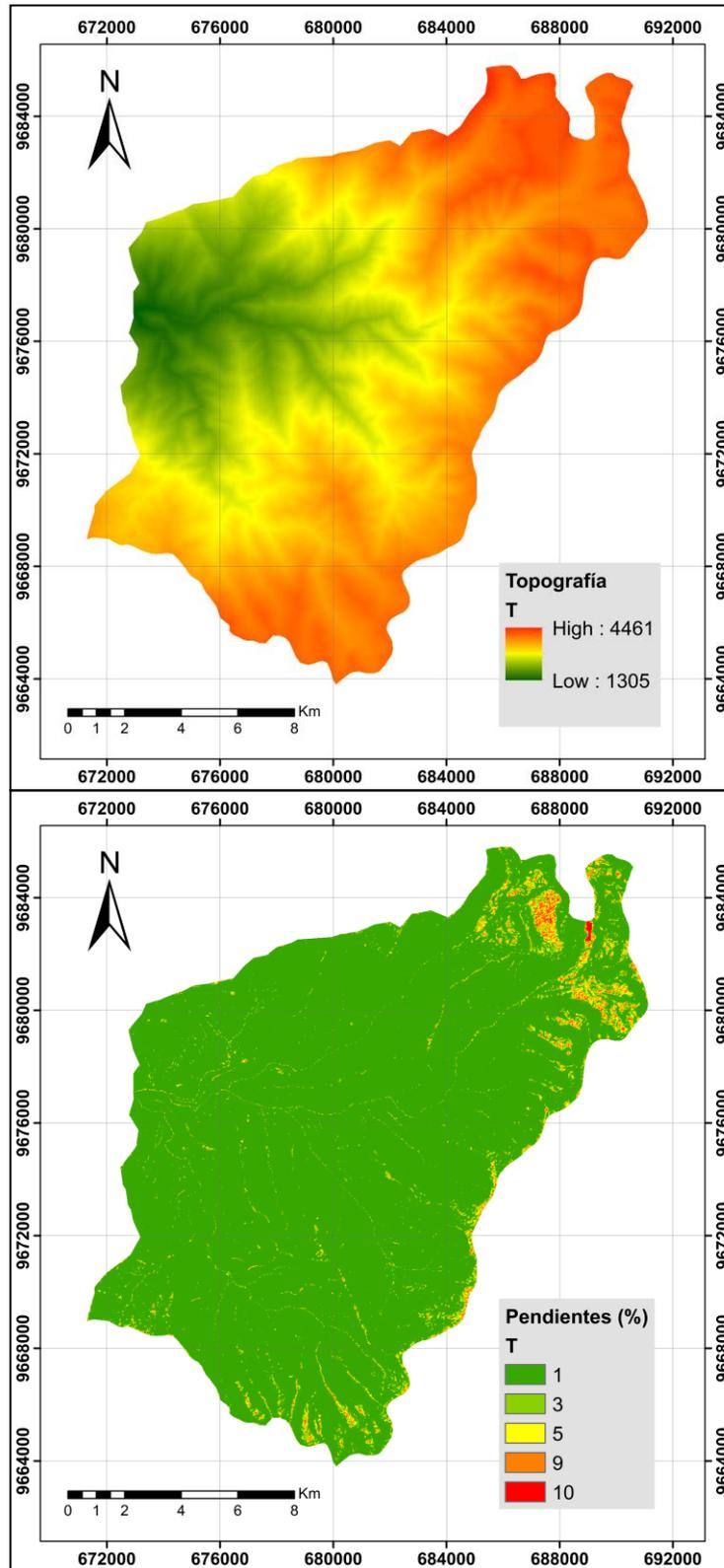
APÉNDICE M

Parámetro S – Método DRASTIC



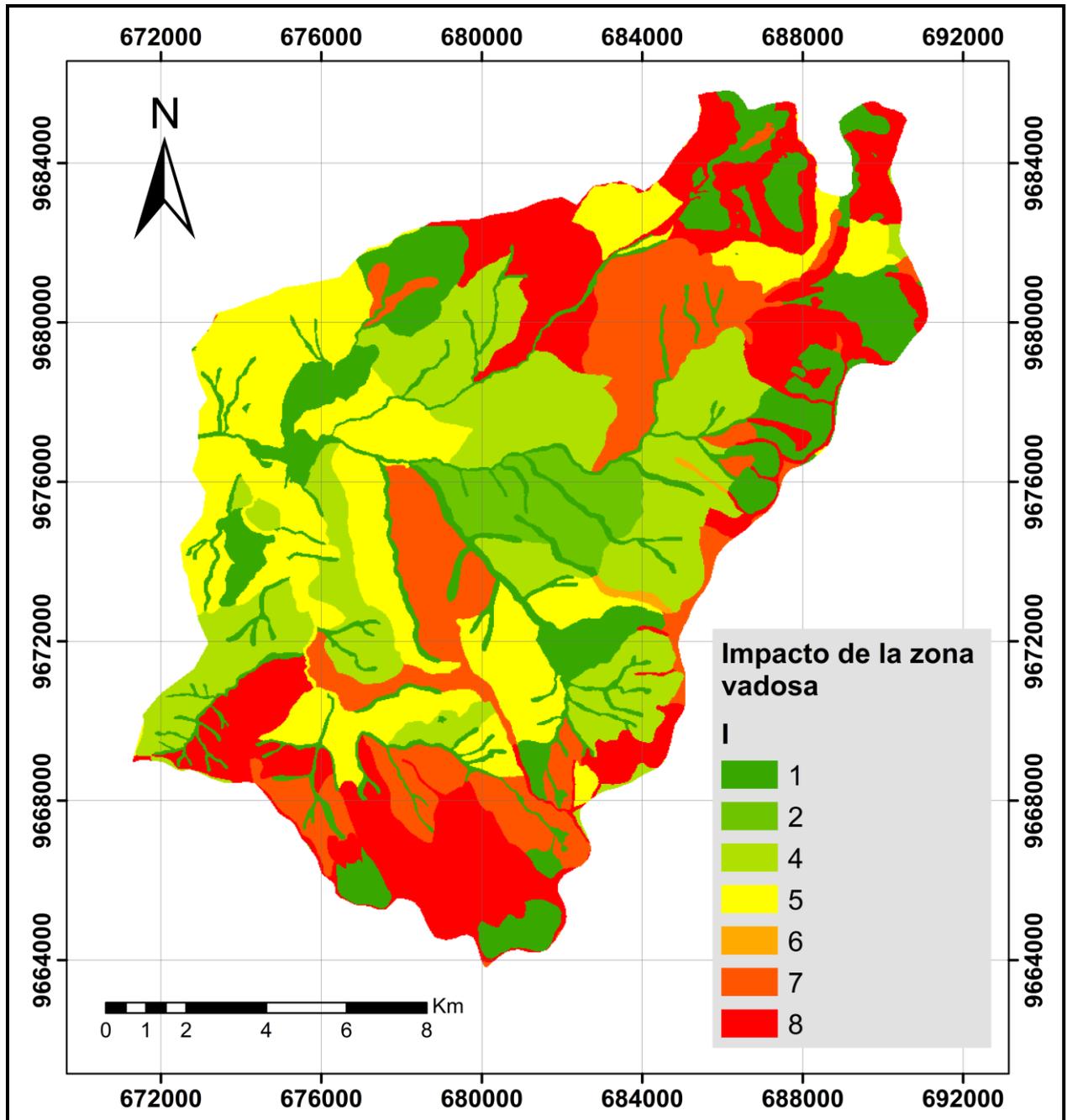
APÉNDICE N

Parámetro T – Método DRASTIC



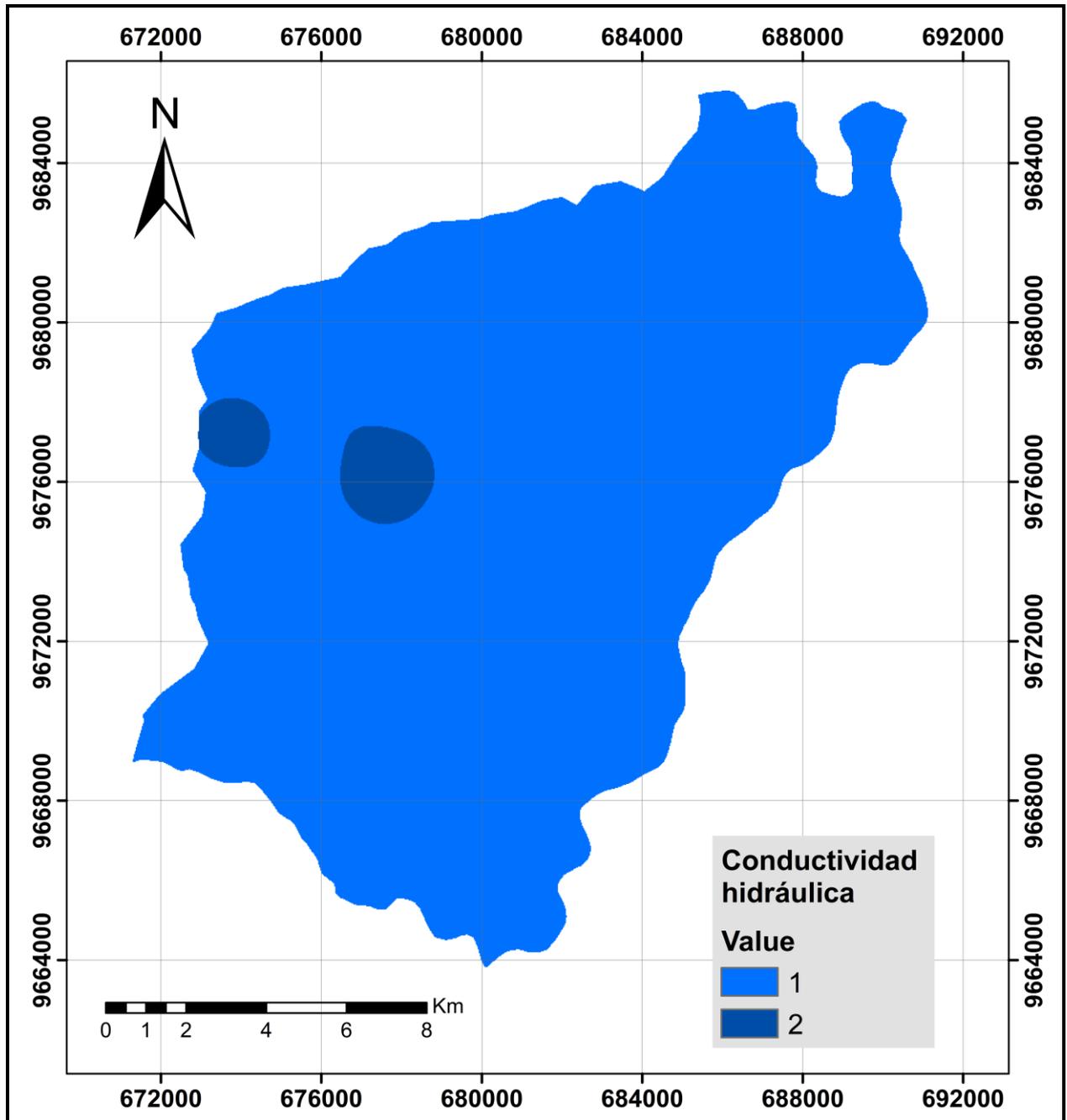
APÉNDICE O

Parámetro I – Método DRASTIC



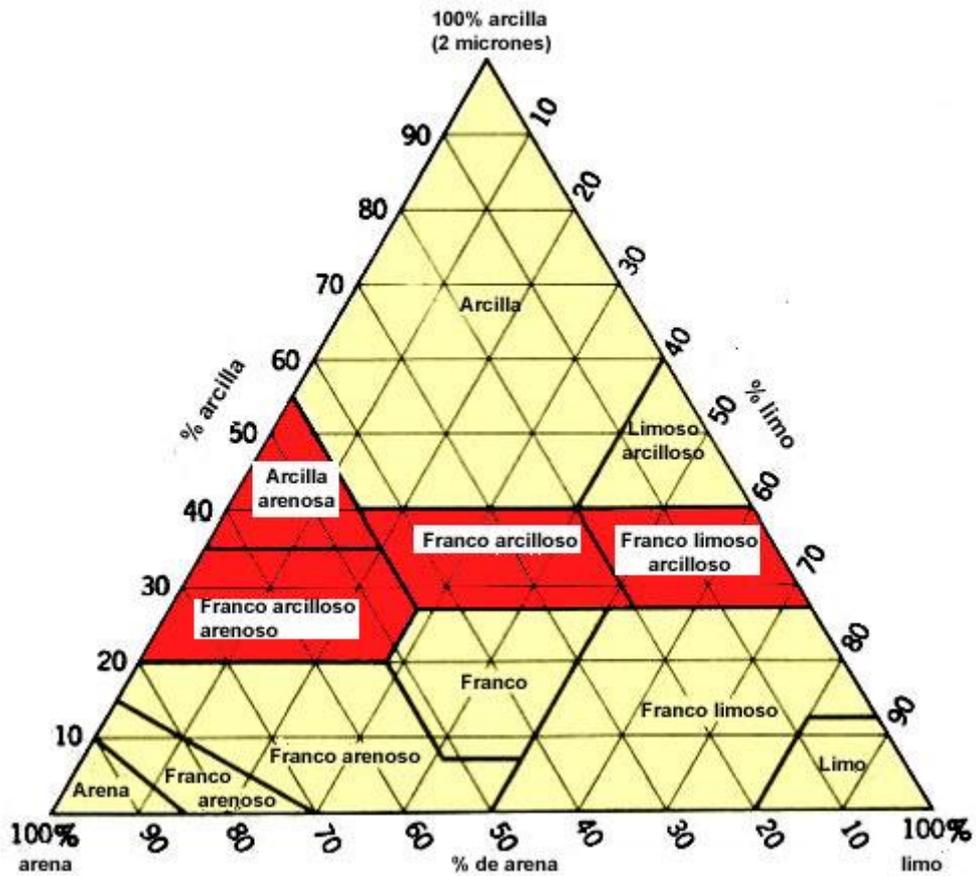
APÉNDICE P

Parámetro C – Método DRASTIC



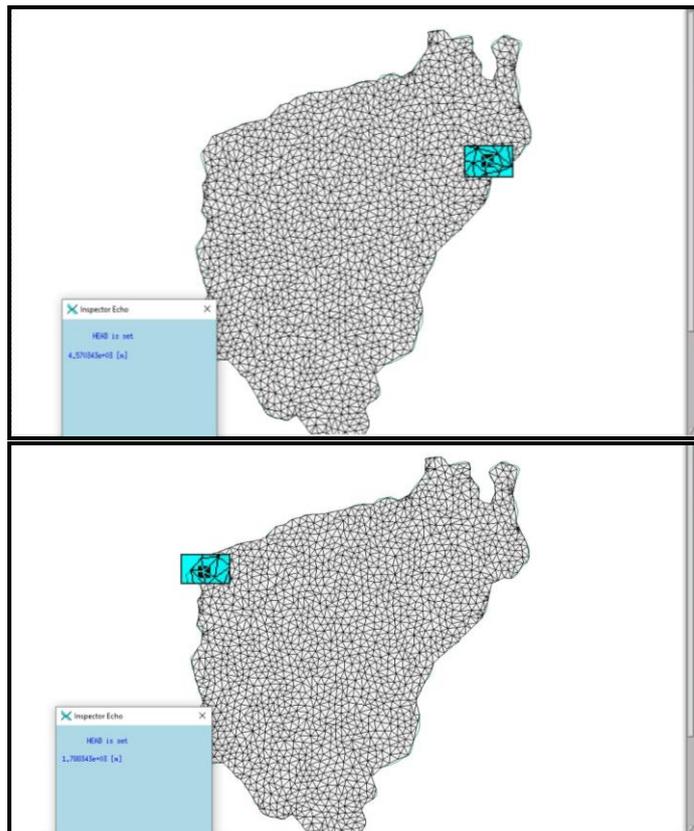
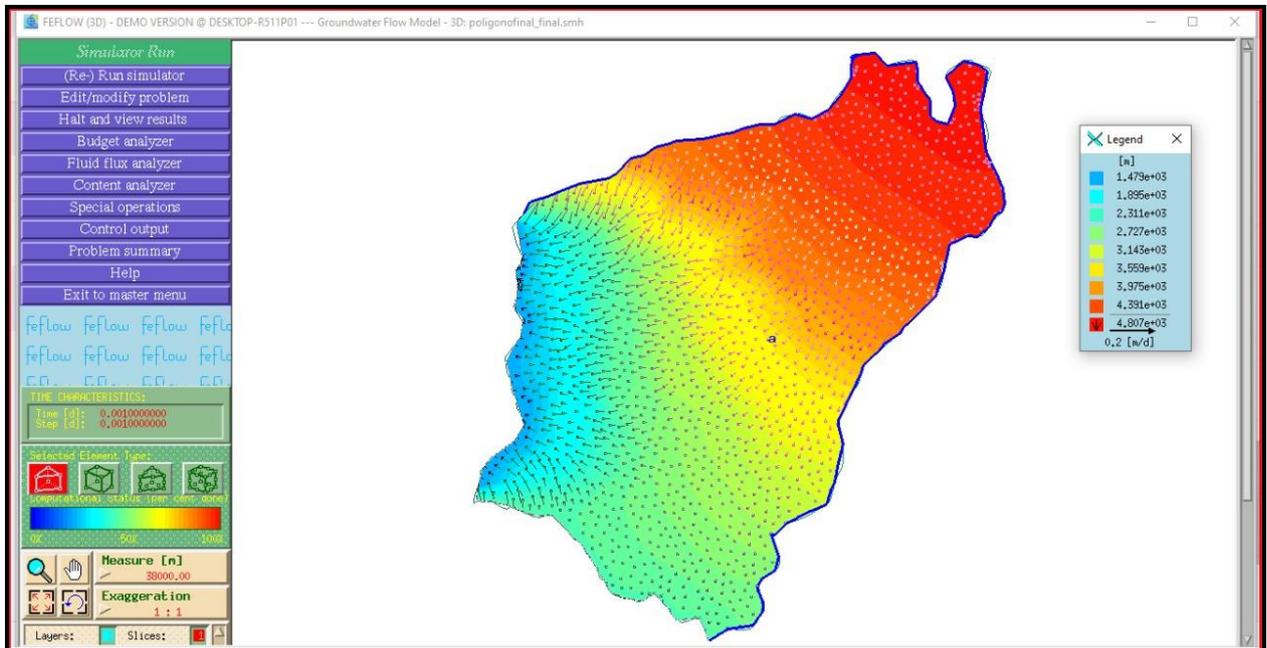
APÉNDICE Q

Diagrama triangular de clases texturales del suelo según el tamaño de partículas (FAO)



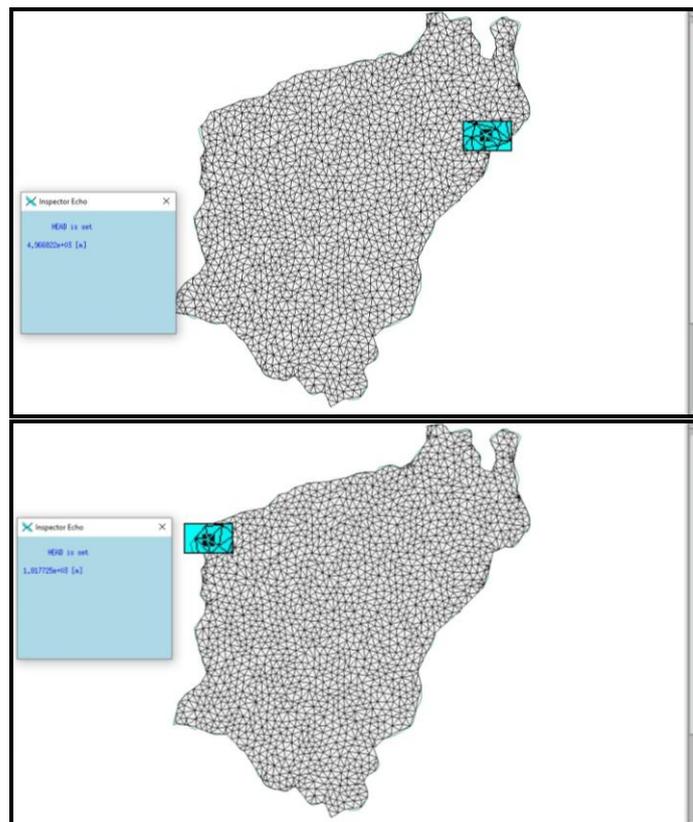
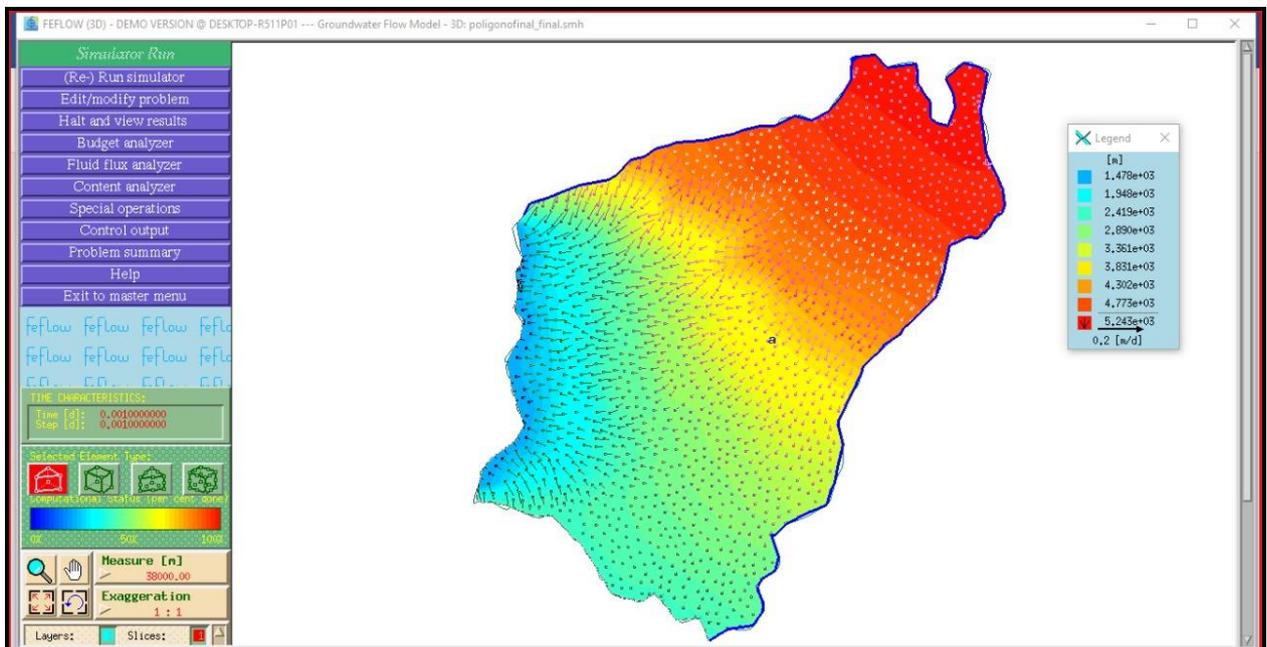
APÉNDICE R

Modelo numérico - Simulación de recarga en un año promedio



APÉNDICE S

Modelo numérico - Simulación de recarga en un año húmedo



APÉNDICE T

Modelo numérico - Simulación de recarga en un año seco

