Por un Desarrollo Agrario Integral y Sostenible

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

DIRECCIÓN ESPECÍFICA DE CIENCIAS AMBIENTALES Y CAMBIO CLIMÁTICO

Trabajo de Tesis

Estimación de la vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo, ubicada entre los departamentos de Masaya y Granada, año 2023

Autor

Br. Ronald Josué Oporta Sandoval

Asesores:

Mp. Álvaro Emilio Martínez Gadea

MSc. Roxana Vanessa Martínez Izaguirre

Managua, Nicaragua
Agosto, 2024

Por un Desarrollo Agrario Integral y Sostenible

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

DIRECCIÓN ESPECÍFICA DE CIENCIAS AMBIENTALES Y CAMBIO CLIMÁTICO

Trabajo de Tesis

Estimación de la vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo, ubicada entre los departamentos de Masaya y Granada, año 2023

Autor

Br. Ronald Josué Oporta Sandoval

Asesores:

Mp. Álvaro Emilio Martínez Gadea

MSc. Roxana Vanessa Martínez Izaguirre

***Presentado a la consideración del honorable comité evaluador como requisito final para optar al grado de Ingeniero en Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental*.**

Managua, Nicaragua
Agosto, 2024

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité evaluador designado por la Dirección Específica de Ciencias Ambientales y Cambio Climático como requisito final para optar al título profesional de:

Ingeniero en Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental

Miembros del Honorable Comité Evaluador

MSc. Raquel Dolores Izaba Ruiz
Presidente

Mp. Mario Cesar Gutiérrez Alarcón
Secretario

Ing. Wilmer Alberto Rodríguez
Vocal

Lugar y fecha: Managua, Nicaragua, 09 de agosto del 2024

DEDICATORIA

Este trabajo de culminación de estudio está dedicado en primer lugar a **Dios**, quien me ha concedido salud, sabiduría, inteligencia y entendimiento durante estos cinco años de carrera, permitiéndome así completar con éxito esta etapa tan importante en mi vida, como es finalizar mi carrera de Ingeniería en Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental.

A mis padres, **Martha Yuliza Sandoval Martínez** y **Ronald Oporta Huete**, los cuales fueron mi principal motivación durante toda esta trayectoria, gracias por su amor, apoyo incondicional, deseo de superación, consejos, paciencia, cariño y dedicación que con mucho esfuerzo y sacrificio me han brindado, más allá de todas sus limitaciones forjando así el hombre de bien que soy hoy en día. No me queda más que agradecer por enseñarme el camino de la vida.

Br. Ronald Josué Oporta Sandoval

AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento a Dios padre, creador de los cielos y la tierra, por su constante protección, bendiciones y guía a lo largo de todos los días de mi vida, tanto para mí como para mi familia.

Así mismo, deseo expresar mi sincera gratitud a la Universidad Nacional Agraria por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por acogerme durante mi periodo de estudio.

Quiero extender mis agradecimientos a la Dirección de Ciencias Ambientales y Cambio Climático, así como a mis profesores. En especial, agradezco a aquellos que, con paciencia, dedicación y entusiasmo, compartieron sus valiosos consejos y conocimientos durante mi carrera, lo que contribuyo significativamente a mi crecimiento tanto profesional como personal.

Agradezco de manera especial al maestro Álvaro Emilio Martínez Gadea y Roxana Vanessa Martínez Izaguirre por la dedicación, tiempo y apoyo constante a lo largo de todas las etapas de esta investigación.

A todas las personas que de una u otra forma fueron un apoyo fundamental en el desarrollo de mi carrera profesional y realización de este trabajo de investigación. Su guía, motivación y confianza depositada hicieron posible alcanzar este objetivo. Gracias por estar presentes en cada paso de este camino.

Br. Ronald Josué Oporta Sandoval

ÍNDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
DEDICATORIA	**i**
AGRADECIMIENTO	**ii**
ÍNDICE DE CONTENIDO	**iii**
ÍNDICE DE CUADROS	**v**
ÍNDICE DE FIGURAS	**vi**
INDICE DE ANEXOS	**viii**
RESUMEN	**ix**
ABSTRACT	**x**
I. INTRODUCCIÓN	**1**
II. OBJETIVOS	**2**
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
III. MARCO DE REFERENCIA	**3**
3.1. Vulnerabilidad Hidrogeológica	3
3.2. Métodos para evaluar la vulnerabilidad a conaminación hidrogeologica	3
3.2.1. Método parametricos GOD	5
3.3. Aplicación del método GOD y GOD-S modificado en América Latina	6
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	**14**
4.1. Ubicación del área de estudio	14
4.2. Caracteristicas biofisicas	16
4.3. Proceso metodológico	23
a) Etapa de planeación	24
b) Etapa de Campo	25
c) Etapa de gabinete	28
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	**31**
5.1. Formaciones geológicas u ocurrencia del sustrato suprayacente	31
5.1.1. Formación Las Sierras (TQps)	31
5.1.2. Sedimentos aluviales (Qal)	32
5.1.3 Cuaternario residual (Qr)	32

5.2. Características hidrogeológicas del área de estudio 35
5.3. Grado de confinamiento del acuífero 35
5.4. Distancia del nivel de agua subterránea o al techo del acuífero 44
5.4. Vulnerabilidad a contaminación del acuífero 48
VI. CONCLUSIONES 54
VII. RECOMENDACIONES 55
VIII. LITERATURA CITADA 56
IX. ANEXOS 58

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1.	Descripción de variables método GOD-S modificado	5
2.	Características hidrogeológicas de las formaciones geológicas	35
3.	Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero de acuerdo con el método GOD-S	49

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1.	Mapa de Vulnerabilidad hidrogeológica para el acuífero de Nagarote, Nicaragua (Cruz, 2019)	7
2.	Mapa índice de vulnerabilidad a contaminación GOD, Valle Central de Costa Rica (Agüero y Rosendo, 2000)	8
3.	Mapa de zonas vunerables según GOD'S (Gutierrez y Arroyo, 2004)	10
4.	Mapa de Vulnerabilidad bajo la Metodología GOD (Buitrago, 2015)	12
5.	Mapa de localización del área de estudio	15
6.	Mapa de los órdenes de suelo presentes en el área de estudio	21
7.	Mapa de las texturas del suelo presentes en el área de estudio	22
8.	Esquema metodológico del trabajo de investigación	23
9.	Diagrama metodológico sobre análisis de vulnerabilidad de los acuíferos	24
10.	Medición del nivel estático del agua subterránea	25
11.	Diagrama metodológico sobre análisis de relación del NEA y relieve	26
12.	Determinación de textura del suelo	26
13.	Formaciones Geológicas	27
14.	Método GOD-S para la evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de acuíferos	29
15.	Generación del mapa de vulnerabilidad a contaminación de acuíferos utilizando el método GOD-S	30
16.	Formación Grupo Las Sierras TQps	31
17.	Formación Cuaternaria Aluvial Qal	32
18.	Formación Cuaternaria Residual Qr	33

19.	Mapa de las formaciones geológicas	34
20.	Perfil Litológico N.º 1	36
21.	Perfil Litológico N.º 2	37
22.	Perfil Litológico N.º 3	38
23.	Perfil Litológico N.º 4	39
24.	Perfil Litológico N.º 5	40
25.	Perfil Litológico N.º 6	41
26.	Perfil Litológico N.º 7	42
27.	Mapa de los tipos de acuífero	43
28.	Coeficientes de correlación profundidades del techo del agua con respecto a la elevación	44
29.	Mapa de curvas piezométricas y dirección del flujo	47
30.	Mapa de vulnerabilidad a contaminación del acuífero	53

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO		PÁGINA
1.	Formatos para la recolección de información	58
2.	Inventario de pozos	59
3.	Sitos visitados para el reconocimiento de las formaciones geológicas	60
4.	Tipos de acuíferos	60
5.	Formaciones geológicas	60
6.	Órdenes de suelo	60
7.	Texturas del suelo	61
8.	Vulnerabilidad del acuífero	61

RESUMEN

El suministro de agua potable y desarrollo económico de los departamentos de Masaya y Granada están fuertemente vinculados a la disponibilidad de los acuíferos locales, por ello se decidió hacer esta investigación con el fin de estimar la vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo, ubicada entre los departamentos antes mencionados, aplicando un modelo de vulnerabilidad multiplicativo, que toma en cuenta cuatro variables, asignándoles valores entre 0 y 1, que son las que nominan el acrónimo: G: ground water ocurrence. Grado de confinamiento hidráulico. O: overall aquifer class. Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes). D: depth to groundwater**.** Profundidad del agua subterránea o nivel estático. S: soil types. Tipos de suelo. Para obtener la información que requiere el modelo, se realizaron mediciones del nivel estático del agua subterránea en una serie de 43 pozos en el año 2023, logrando así construir las isopiezas del acuífero y elaborar el mapa piezométrico, obteniendo 10 pisos altitudinales con una separación de 5, 10, 15 y 25 metros, a su vez se muestra la dirección del flujo descargando hacia el lago Cocibolca. Se determinó que el mayor porcentaje del área total del acuífero es semiconfinado, ocupando el 42.27% del área de la subcuenca, 32.98% es un acuífero libre y el 16.98% es confinado. Las formaciones geológicas reportadas para la zona de estudio son: Grupo Las Sierras representa el 52.23%, Cuaternario Aluvial el 30% y Cuaternario Residual el 10%. Los órdenes de suelo predominantes en el área de estudio fueron: Mollisols, Entisols, Alfisols y Andisols. Las texturas del suelo presentes en área son: Arcillo Arenoso, Franco Limoso, Franco Arcilloso y Franco Arenoso. Los resultados de la investigación reflejan que la vulnerabilidad a contaminación del acuífero oscila desde 0.1 baja hasta 0.3 media, encontrando que el 70.94% del área total del acuífero tiene vulnerabilidad baja, seguido del 21.29% con una vulnerabilidad media. Es importante considerar estos niveles de vulnerabilidad por zona al momento de planificar el desarrollo industrial y la implementación de otras actividades productivas que se pueden constituir como amenazas de contaminación al acuífero del área de estudio.

Palabras clave: GOD-S, NEA, Geología, Isopiezas, Dirección, Flujo.

ABSTRACT

The supply of drinking water and economic development of the departments of Masaya and Granada are strongly linked to the availability of local aquifers, so it was decided to carry out this research in order to estimate the vulnerability to contamination of the aquifer of the Apoyo hydrographic sub-basin, located between the aforementioned departments, applying a multiplicative vulnerability model. which takes into account four variables, assigning them values between 0 and 1, which are the ones that nominate the acronym: G: ground water occurs. Degree of hydraulic confinement. O: overall aquifer class. Occurrence of the overlying substrate (unsaturated zone or confining layers). D: depth to groundwater**.** Depth of groundwater or static level. S: soil types. Soil types. To obtain the information required by the model, measurements of the static level of groundwater were carried out in a series of 43 wells in 2023, thus managing to build the isopieces of the aquifer and elaborate the piezometric map, obtaining 10 altitudinal levels with a separation of 5, 10, 15 and 25 meters, in turn showing the direction of the flow discharging into Lake Cocibolca. It was determined that the largest percentage of the total aquifer area is semi-confined, occupying 42.27% of the sub-basin area, 32.98% is a free aquifer and 16.98% is confined. The geological formations reported for the study area are: Las Sierras Group represents 52.23%, Alluvial Quaternary 30% and Residual Quaternary 10%. The predominant soil orders in the study area were: Mollisols, Entisols, Alfisols and Andisols. The soil textures present in the area are: Sandy Clay, Silty Loam, Clay Loam and Sandy Loam. The results of the research reflect that the vulnerability to contamination of the aquifer ranges from 0.1 low to 0.3 medium, finding that 70.94% of the total aquifer area has low vulnerability, followed by 21.29% with a medium vulnerability. It is important to consider these levels of vulnerability by area when planning industrial development and the implementation of other productive activities that may constitute threats of contamination to the aquifer of the study area.

Keywords: GOD-S, NEA, Geology, Isopieces, Direction, Flow.

I. INTRODUCCIÓN

Nicaragua, es un país reconocido por su relevante capital natural; sin embargo, enfrenta importantes retos en la gestión de los recursos hídricos superficiales como subterráneos. Los departamentos de Masaya y Granada dependen en gran medida del acuífero subterráneo para satisfacer las necesidades de agua potable para consumo y la realización de sus diversas actividades económicas. Es importante destacar que el crecimiento demográfico conlleva a diversas acciones humanas que aumentan la presión sobre estos recursos, lo que conlleva un incremento de la vulnerabilidad de los acuíferos.

La zona de investigación está situada en la reconocida subcuenca hidrográfica Apoyo, que abarca los departamentos de Masaya y Granada; distribuyéndose en siete municipios: Tisma, Masaya, Catarina, San Juan de Oriente, Diría, Diriomo y Granada. "Las características geomorfológicas notables incluyen terrenos llanos y bajos, como la caldera volcánica de la Laguna de Apoyo en la Ciudad de Masaya, y el Volcán Mombacho en la Ciudad de Granada. Estas estructuras topográficas se encuentran en la Depresión de Nicaragua y la Cordillera Volcánica Nicaragüense, en áreas donde la pendiente no supera los 50 grados de inclinación" (Guatemala, 2007, p.19).

Para caracterizar los acuíferos es necesario la aplicación de herramientas y métodos avanzados, que permitan la evaluación aproximada de variables que permitan conocer la dinámica de los acuíferos y sus interacciones con factores externos. El método GOD-S, modificado es un modelo multiplicativo, que toma en cuenta las variables del nivel de confinamiento del acuífero, sustrato litológico, profundidad del agua subterránea y textura del suelo para caracterizar la vulnerabilidad a contaminación de los acuíferos en varios escenarios.

El método GOD-S, es el que más se ajusta a los objetivos de la investigación realizada en el acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo, debido a su fácil aplicación e importancia social y ambiental de este recurso. Por tanto, se pretende determinar las áreas con diversos niveles de vulnerabilidad ante eventualidades que impliquen la percolación de diversas sustancias contaminantes al acuífero. Los resultados de este estudio son fundamentales, para la toma de decisiones en cuanto a la gestión de los recursos hídricos. El aporte de esta investigación puede considerarse al momento de planificar el desarrollo económico y social de estos municipios, pues evidencia el grado de vulnerabilidad en las áreas que comprende este acuífero y si consideramos

las amenazas que implican las actividades humanas podremos tener conocimiento del riesgo que implica cada acción nuestra en el territorio.

La investigación se considera como una herramienta clave para apoyar la planificación prospectiva del territorio y en caso de que susciten contingencias implementar las medidas correctivas más adecuadas considerando los resultados de este estudio.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Estimar la vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo, ubicada entre los departamentos de Masaya y Granada, año 2023.

2.2. Objetivos específicos

- Describir las características geológicas y tipos de suelos presentes en la subcuenca.
- Explicar las características hidrogeológicas e hidrodinámicas del área de estudio.

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Vulnerabilidad hidrogeológica

Como señala Foster et al (2013) “El concepto de "vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos" fue introducido inicialmente por Margat en 1968, y posteriormente, en la década de 1980, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) propuso una definición práctica junto con un conjunto de herramientas a través de DRASTIC (Aller et al. 1987). Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) presentaron GOD (Foster 1987; Foster e Hirata 1988) en la misma línea” (p.1).

La idea busca expresar la susceptibilidad de un acuífero a sufrir impactos negativos en un lugar específico debido a la presión contaminante proveniente de la superficie terrestre. El objetivo de este término es reflejar la variabilidad en la protección natural proporcionada por la capacidad para mitigar los contaminantes por parte de la zona insaturada o los lechos semi-confinadores que se encuentran sobre el acuífero (Foster et al, 2013, p.1).

La vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos es un concepto fundamental para la gestión y protección de los recursos hídricos subterráneos. Permite evaluar y comprender la susceptibilidad de los acuíferos a la contaminación, lo cual es crucial para implementar estrategias efectivas de protección y mitigación.

Es relevante destacar que las metodologías y herramientas desarrolladas por diversas organizaciones a lo largo del tiempo proporcionan un marco práctico para evaluar esta vulnerabilidad, destacando la importancia de la protección natural de los acuíferos a través de las características geológicas de las zonas no saturadas o los lechos semiconfinados.

3.2. Métodos para evaluar la vulnerabilidad a contaminación hidrogeológica

Las técnicas para analizar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se clasifican en los cuatro modelos que se detallan a continuación:

Modelos de simulación

"Se emplean fórmulas numéricas que imitan los procesos de transporte que regulan los contaminantes, siendo útiles para evaluar la vulnerabilidad de manera específica" (Vargas, 2010, p.13).

Métodos estadísticos

Los enfoques estadísticos se emplean para medir la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea al determinar la relación estadística o dependencia entre la contaminación registrada, las condiciones ambientales observadas que podrían o no indicar vulnerabilidad, y las actividades asociadas con el uso del suelo que representan posibles fuentes de contaminación, como el uso de fertilizantes y la presencia de tanques sépticos (Vargas, 2010, p.13).

Métodos de superposición e índices (o paramétricos)

Estos métodos se fundamentan en la integración de diversos factores (como litología, tipo de suelo, espesor de la zona no saturada, entre otros) y se emplean para evaluar la vulnerabilidad intrínseca. Cada factor recibe una calificación cuantitativa, y se les puede asignar diferentes valores de importancia para calcular el resultado final, que se traduce en un índice numérico de vulnerabilidad (iV) (Vargas, 2010, p.13).

Para un método *n* de parámetros *P* y n factores de ponderación *fP*, el índice de vulnerabilidad *iV* se calcula como: $iV = \sum_{j=1}^{n} fPj\ x\ Pj$. Mediante la obtención de este valor *iV,* y de acuerdo con el método usado, la vulnerabilidad de los acuíferos se clasifica desde baja, media, alta, muy alta hasta extrema (Vargas, 2010, p.13).

Ambientes Hidrogeológicos

"Analizan la susceptibilidad de extensos entornos hidrogeológicos de manera cualitativa mediante la superposición de mapas temáticos. Se emplea cuando la información detallada y específica es limitada o insuficiente" (Vargas, 2010, p.13).

La evaluación de la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea se realiza mediante diversos métodos adaptados a diferentes condiciones y niveles de información. Los modelos de simulación utilizan fórmulas numéricas para imitar procesos de transporte de

contaminantes, permitiendo evaluaciones detalladas. Los métodos estadísticos establecen relaciones entre la contaminación observada, las condiciones ambientales y las actividades humanas. Los métodos de superposición e índices integran factores ambientales, asignándoles calificaciones y ponderaciones para calcular un índice numérico de vulnerabilidad, que clasifica la vulnerabilidad de baja a extrema. Finalmente, el análisis cualitativo de ambientes hidrogeológicos mediante la superposición de mapas temáticos es útil cuando la información detallada es limitada.

Cada enfoque ofrece una perspectiva única y complementaria, proporcionando una evaluación integral de la vulnerabilidad de los acuíferos según las características y datos disponibles en cada situación específica.

3.2.1. Método paramétrico GOD

Método GOD. El sistema de indexación GOD, presentado por Foster en 1987, puede utilizarse en lugares de estudio con información limitada, distribución desigual de datos o incertidumbre en la información. Esta metodología consta de tres parámetros: G, O y D, cuyos valores se asignan según la contribución en la protección contra la contaminación (Vargas, 2010, p.15).

La metodología ajustada, denominada GOD-S, asigna valores al parámetro S según las características de textura del suelo, que van desde texturas muy finas (arcillosas) hasta texturas muy gruesas (pedregosas), especialmente en zonas donde el espesor del suelo es mayor a 0.5 metros (Banco Mundial, 2002, p.28).

Cuadro 1. *Descripción de variables método GOD-S modificado*

Variable	Descripción	Rango de Índice	Valores y significados
G (Groundwater occurrence)	Representa el nivel de confinamiento hidráulico mediante la identificación del tipo de acuífero.	0 a 1	0: Ausencia de acuíferos. 1: Presencia de un acuífero libre o freático Intermedios: Acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados.

O (Overall aquifer class)	Descripción de la región no saturada del acuífero o de las capas confinantes.	0.4 a 1.0	0.4: Materiales no consolidados. 0.9 - 1.0: Rocas compactas con fracturas o procesos kársticos.
D (Depth)	Relacionado con la posición del nivel freático en acuíferos no confinados o con la profundidad del techo del acuífero en los confinados.	0.6 a 1.0	0.6: Acuíferos no confinados con una profundidad superior a 50 metros. 1.0: Acuíferos en formaciones rocosas fracturadas.
S (Soil type)	Vinculado con la capacidad de atenuación del suelo considerando exclusivamente su textura.	0.5 a 1.0	0.5: Textura arcillosa no expansiva. 0.9 - 1.0: Suelo franco arenoso, arcilla expansiva, arena gruesa y grava.
Cálculo del Índice de Vulnerabilidad GOD-S		**Fórmula**: iV = G×O×D×S	

Esta metodología evalúa la vulnerabilidad del acuífero como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, sin tomar en cuenta el tipo de contaminante. Su aplicación proporciona de manera rápida una visión de la vulnerabilidad en la zona donde la información sobre el subsuelo y los sistemas de agua subterránea es limitada.

3.3.Aplicación del método GOD y GOD-S modificado en América Latina

Caracterización de la vulnerabilidad global a contaminación del acuífero de la microcuenca del municipio de Nagarote. Departamento de León. 2017-2019

Cruz (2019), menciona que, en Nicaragua el sector industrial, doméstico y agropecuarios, son los principales usuarios de los recursos hídricos, tanto superficiales, como subterráneo, su total dependencia de este recurso sumado a su manejo irracional los hace potenciadores de amenazas por contaminación de origen antrópico, por esta razón se dispuso a realizar este

estudio que es pertinente al contexto actual y se realizó, para el acuífero de la microcuenca del municipio de Nagarote (p.10).

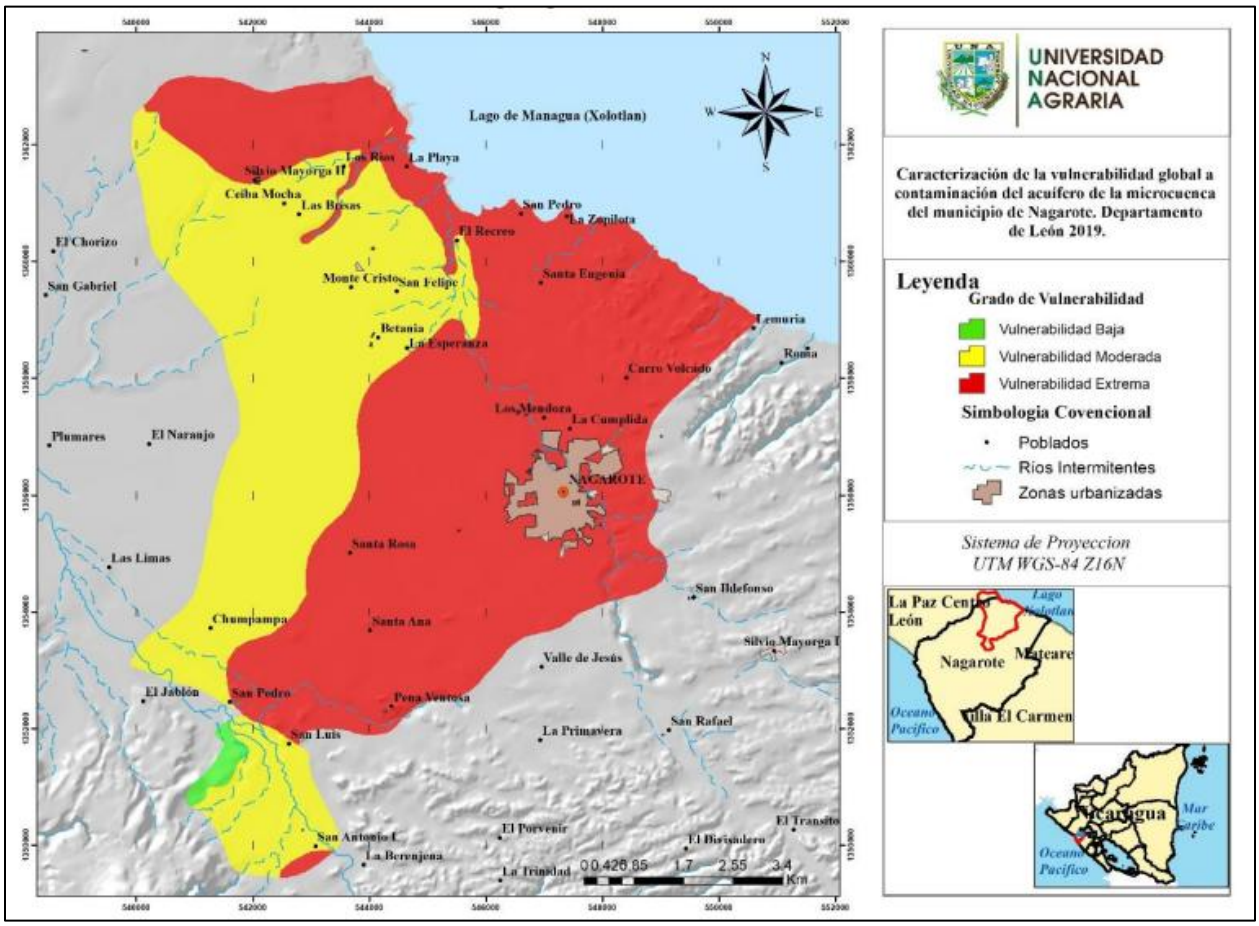


Figura 1. Mapa de Vulnerabilidad hidrogeológica para el acuífero de Nagarote, Nicaragua (Cruz, 2019).

Conclusiones del estudio y metodología

Según Cruz (2019) afirma que:

> La vulnerabilidad no es el único criterio para conocer el riesgo de contaminación de un acuífero. Sin embargo, es el primer paso para caracterizar el riesgo y proceder a la identificación de áreas críticas.
>
> La estimación de la vulnerabilidad a contaminación y su mapeo constituyen elementos importantes para la determinación del riesgo, esto ayuda a la toma de decisiones, permitiendo orientar adecuadamente las acciones para la protección de las aguas subterráneas del acuífero.

El modelo GOD se adapta al contexto nacional, en el que existe poca disponibilidad de información. El modelo requiere de pocos parámetros de entrada para brindar una estimación global de la vulnerabilidad a contaminación de un acuífero y su viabilidad permite replicarlo en otros sitios de interés.

Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica

Agüero y Rosendo (2000), indican que, el área de estudio comprende parte de los cantones de Santo Domingo, Heredia, San Isidro y el cantón de San Pablo, todos de la provincia de Heredia. Esta área es importante porque se encuentra dentro de la zona de captación de pozos definida por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y está sujeta a una fuerte urbanización (párr.2).

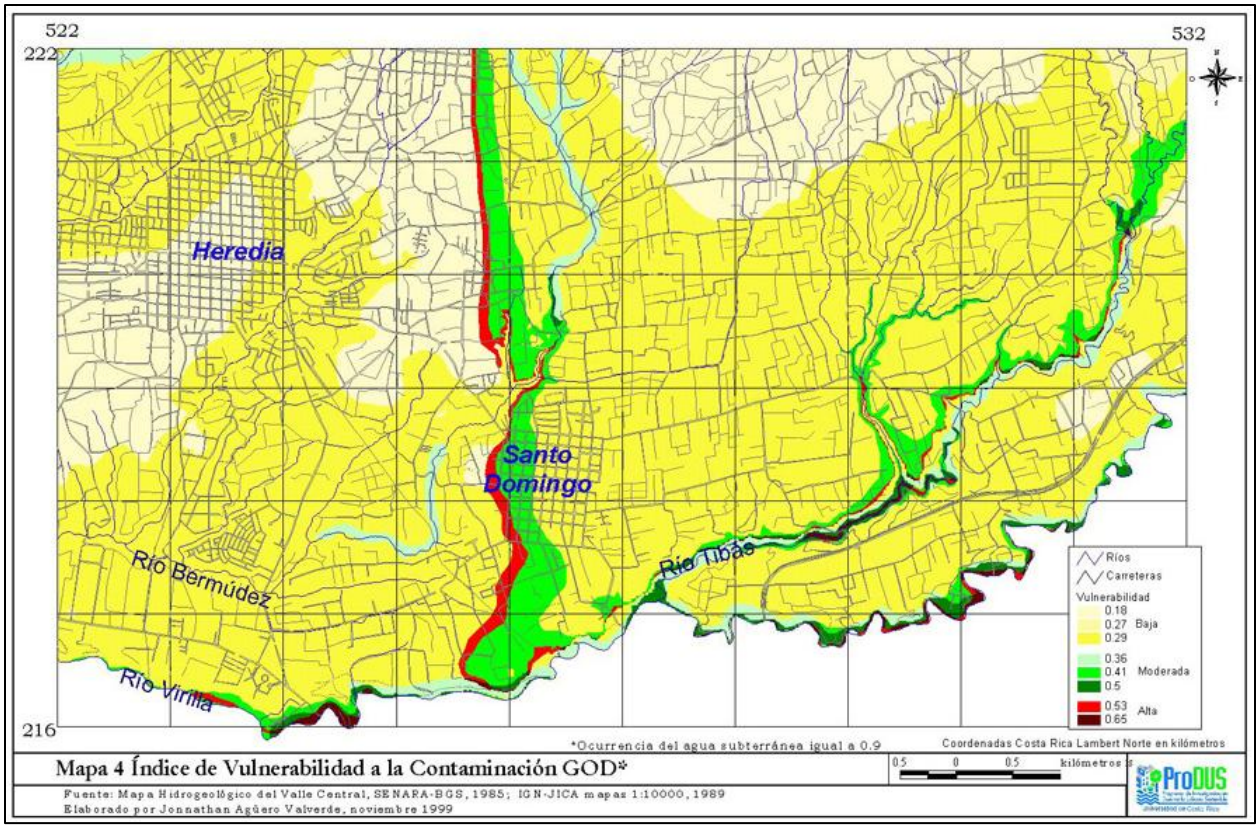


Figura 2. Mapa índice de vulnerabilidad a contaminación GOD, Valle Central de Costa Rica (Agüero y Rosendo, 2000).

Conclusiones del estudio y metodología

Según Agüero y Rosendo (2000) afirman que:

> La metodología GOD desprecia el efecto de atenuación del suelo para determinar la vulnerabilidad mientras el DRASTIC lo toma en cuenta. En el método GOD puede ser incluido el efecto del suelo al estimar la amenaza de contaminación.
>
> La clasificación del substrato litológico o zona no saturada del método GOD es más apropiada para un medio geológico de origen volcánico que la utilizada por el DRASTIC.
>
> Cuando existe información suficiente puede utilizarse el método GOD como determinación preliminar y el método DRASTIC para la estimación de la vulnerabilidad de una forma más detallada.
>
> En general los índices DRASTIC y GOD coinciden en las áreas de más alta vulnerabilidad, debido al mayor peso de las variables de profundidad y conformación de la zona no saturada en el índice DRASTIC, que son dos de las tres variables del índice GOD.

Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del municipio de Santiago de Tolú a la contaminación por saneamiento in situ

Gutiérrez y Arroyo (2004) señalan que, la investigación se realizó en las instalaciones de los pozos

> artesanos y pozos profundos en operación para la extracción de agua subterránea, localizados en el sector comprendido entre el arroyo Guaní al norte y el arroyo Pichulín al sur de campo de pozos de la acueducto del municipio en estudio, y limitado al oeste por la franja costa del Mar Caribe y al este hasta una distancia de 2,5 kilómetros, medidos desde el tanque de almacenamiento elevado en las afueras del área urbana del municipio (p.61).

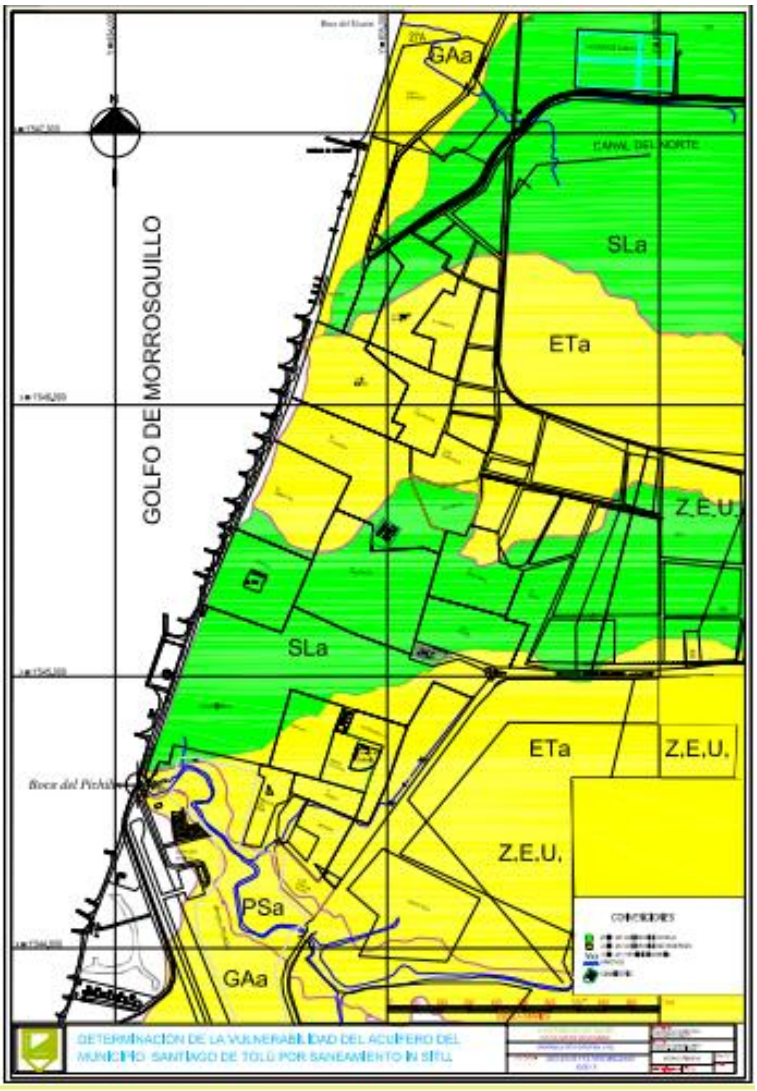


Figura 2. Mapa de zonas vunerables según GOD'S (Gutierrez y Arroyo, 2004, p.110).

Conclusiones del estudio y metodología

Según Gutiérrez y Arroyo (2004) afirman que:

> El método GOD por su parte utiliza la profundidad del agua subterránea, el impacto en la zona no saturada y la ocurrencia del agua subterránea. Y es necesario incorporar el parámetro (S) suelo para poder considerar el efecto de atenuación de este sobre la carga contaminante.
>
> El método DRASTIC es mucho más complejo que el método GOD por la utilización de un número mayor de variables. Sin embargo, algunas de estas variables son tomadas en cuenta por el método GOD en forma indirecta a través de la amenaza.

Otra diferencia sustancial es el modelo matemático. Mientras que el GOD, es un modelo multiplicativo, el DRASTIC es un modelo sumativo con asignación de pesos a las variables.

El índice DRASTIC presenta una mayor variabilidad que el índice GOD, tanto por su mayor número de variables como por su mayor número de categorías en cada variable.

Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el municipio de Funza, Cundinamarca.

Buitrago (2015), sostiene que, en el Municipio de Funza, el agua potable proviene principalmente de tres pozos profundos que captan agua a más de 600 metros de profundidad, y en menor medida, de agua comprada a la empresa de acueducto de Bogotá. Esta investigación surge de la necesidad de evaluar el estado actual y la vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo frente a actividades agrícolas, industriales y comerciales en la región, además de analizar la sostenibilidad futura de este recurso (Buitrago, 2015, p.13).

Conclusiones del estudio y metodología

Según Buitrago (2015) afirma que:

> A partir de la utilización de los resultados obtenidos en cada parámetro utilizando la metodología GOD, se obtiene el grado de vulnerabilidad de cada capa acuífera, en el cual el Acuífero Sabana presenta un índice de vulnerabilidad clasificada como DESPRECIABLE y puede inferirse que el acuífero es vulnerable a largo plazo (millones de años) a contaminantes persistentes.
>
> Los acuíferos del Grupo Guadalupe presentan un grado de contaminación MEDIA, siguiendo la metodología GOD, debido que aflora en una pequeña parte del área de estudio y su grado de vulnerabilidad puede darse a mediano plazo. Por último, el acuífero asociado a los Depósitos Cuaternarios Aluviales refleja un ALTO índice de vulnerabilidad a la contaminación, ligada al tipo de material que lo conforma y su contaminación puede darse de manera inmediata.

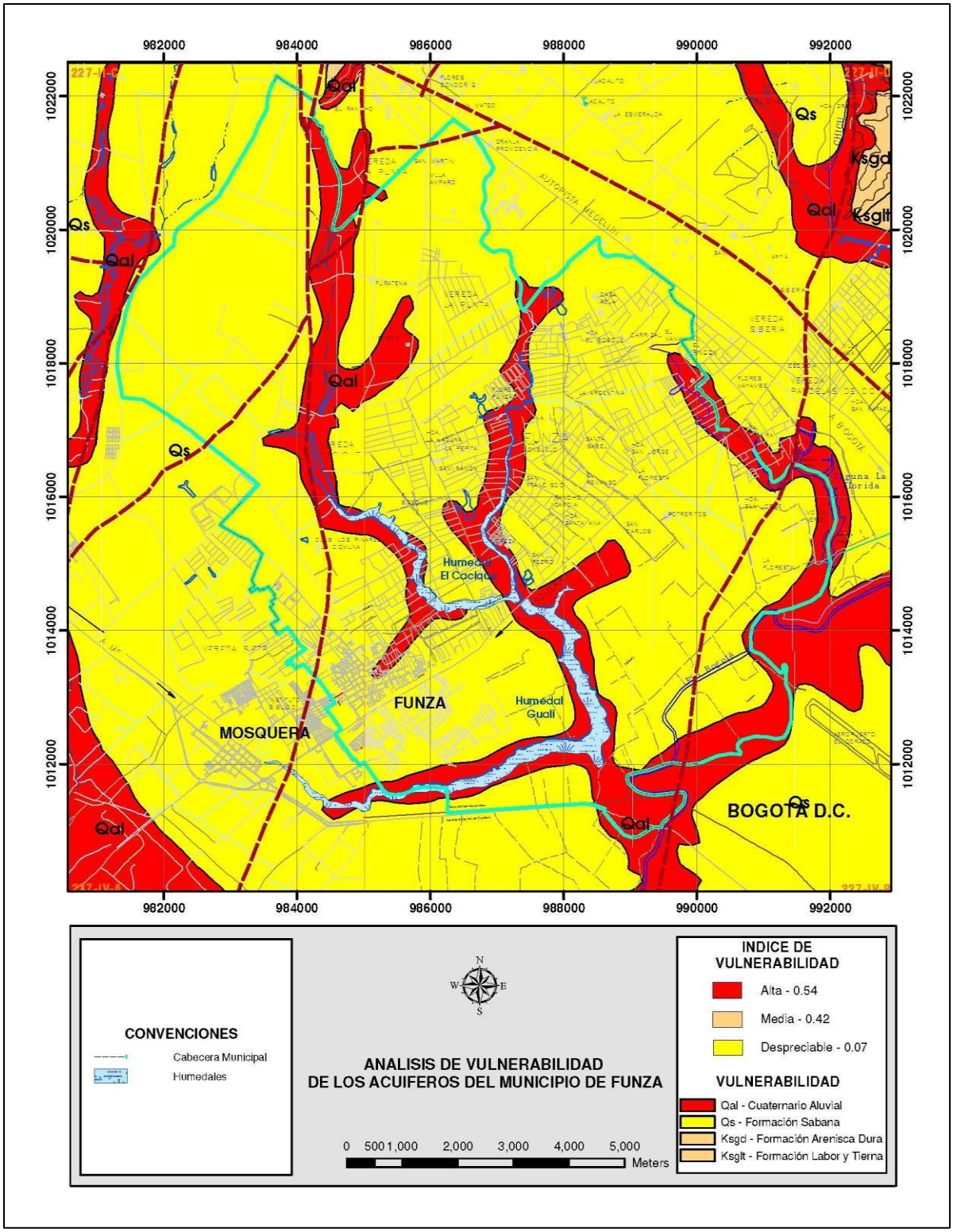


Figura 2. Mapa de Vulnerabilidad bajo la Metodología GOD (Buitrago, 2015, p.26).

La caracterización de la vulnerabilidad de los acuíferos puede realizarse utilizando métodos como DRASTIC, SINTACS, EPIK y GALDIT. Estos métodos requieren un mayor número de variables o parámetros, lo que incrementa su complejidad. Sin embargo, esta complejidad adicional puede ser beneficiosa, ya que algunos de estos métodos son particularmente útiles para evaluar la vulnerabilidad en acuíferos costeros.

La diversidad de metodologías disponibles no implica necesariamente que una deba reemplazar a la otra. En muchos casos, los métodos pueden utilizarse de manera complementaria. Por ejemplo, el método GOD puede emplearse como una fase inicial de evaluación de la vulnerabilidad. Este método preliminar genera insumos valiosos que pueden servir como base para aplicar otros modelos más complejos. De esta manera, se logra una evaluación más integral y precisa de la vulnerabilidad de los acuíferos, aprovechando las fortalezas de cada metodología en diferentes etapas del análisis.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación desarrollada en la subcuenca hidrográfica Apoyo, adopta un enfoque cuantitativo no experimental, tiene por objetivo estimar la vulnerabilidad a contaminación del acuífero utilizando el método multiplicativo GOD-S. En este proceso, se estimaron los diferentes niveles de vulnerabilidad en el área que comprende el acuífero, además, se propone la implementación de medidas preventivas con el fin de preservar y proteger este recurso.

4.1.Ubicación del área de estudio

La subcuenca hidrográfica Apoyo se ubicada entre los departamentos de Masaya y Granada abarcando siete municipios reconocidos como centros turísticos y culturales de referencia en Nicaragua, también abarca las orillas del Lago Cocibolca; este tiene una extensión total de 8,000 km^2 y se alimenta de flujos de agua Subterráneas que provienen de este acuífero y otros que convergen en sus costas, así como también de las fuentes superficiales permanentes e intermitentes o efímeras presentes en el área.

La subcuenca hidrográfica Apoyo tiene un área de 283 km^2 y un perímetro de 125 km^2, esta se encuentra localizada en las coordenadas geográficas 11°55′19″ Norte y 86°01′44″ Oeste, así mismo abarca gran parte del área de cuatro municipios de Masaya tales como: Tisma, Masaya, Catarina y San Juan de Oriente. En el caso de Granada son: Granada, Diriá y Diriomo. Del mismo modo abarca 54 comunidades en su totalidad, donde 34 comunidades pertenecen al departamento de Masaya y 20 al de Granada. Ver figura 5.

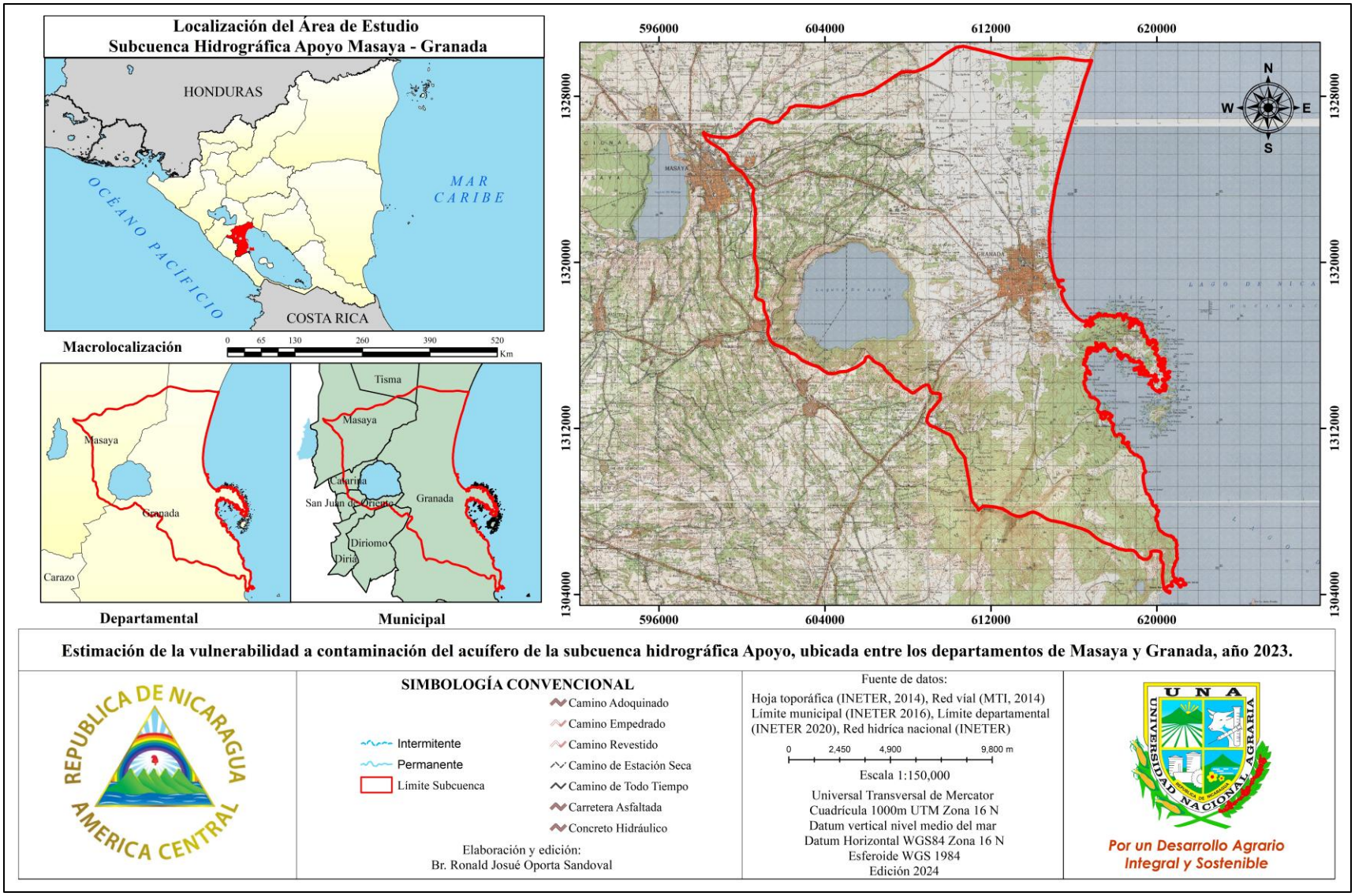


Figura 5. Mapa de localización del área de estudio

4.2.Características biofísicas

Clima

En la región de Masaya, el periodo de lluvias se caracteriza por cielos nublados, mientras que la temporada seca se presenta con vientos y cielos parcialmente nublados, manteniéndose muy cálido y sofocante durante todo el año. A lo largo de las estaciones, la temperatura generalmente oscila entre 21 °C y 33 °C, siendo poco frecuente que descienda por debajo de los 19 °C o supere los 35 °C (Weather Spark, 2023, prr.1).

En la región de Granada, la época de lluvias se caracteriza por cielos nublados, mientras que la temporada seca es ventosa y con cielos parcialmente nublados, manteniéndose muy cálida y opresiva durante todo el año. A lo largo de las estaciones, la temperatura generalmente fluctúa entre 22 °C y 34 °C, siendo poco común que descienda por debajo de los 20 °C o que supere los 35 °C (Weather Spark, 2023, prr.1).

Hidrología

Hidrográficamente el área de estudio es parte de la cuenca número 69 "Río San Juan". Dentro y a los alrededores de la subcuenca corren quebradas de régimen intermitente y corrientes efímeras, que solo drenan agua en los eventos de lluvia. Las quebradas pasan por el casco urbano de la ciudad de Granada y las comunidades San Luis, El Capulín Nº 1, El Fortín I y II, Obregón y El Charco, en dirección hacia el lago de Nicaragua o Cocibolca.

Geología

La subcuenca Apoyo se ubica dentro del área de la "Depresión Nicaragüense", una de las cuatro provincias geográficas-geomorfológicas en que se divide el país; esta área es típicamente volcánica donde se han presentado erupciones diferenciadas. En las zonas dentro de la cual se encuentra el área de estudio, las rocas volcánicas con edades que van desde el Pliopleistoceno hasta el Reciente, son predominantes (INETER, 2011, p.10).

Le siguen en orden de abundancia los depósitos aluviales Cuaternarios. Entre las rocas volcánicas, los flujos de lava y los piroclastos sueltos consolidados son los más abundantes. Las lavas proliferan en la cima, faldas altas y medias del volcán Mombacho

y los piroclastos en las partes bajas de las faldas del volcán mencionado y en la llanura volcánica. En los sectores circundantes a la Caldera de Apoyo, los piroclastos de pómez de carácter dacítico, se presentan en gruesos depósitos cubriendo a lavas dacíticas y a tobas líticas y aglomeráticas del Grupo Las Sierras (INETER, 2011, p.10).

Geomorfología

La zona de investigación forma parte de la provincia geomorfológica conocida como la Depresión Nicaragüense, forma una franja prolongada con rumbo NE-SO ubicada entre los lagos Xolotlán y Cocibolca, la depresión nicaragüense posee una orientación en dirección noroeste-sureste y se extiende de manera paralela a lo largo de la costa del Pacífico de Nicaragua. En la parte sureste, la Depresión está ocupada por el extenso lago de Cocibolca y al noroeste se extiende el lago Xolotlán, casi céntrica y a lo largo de la depresión emerge la cadena volcánica activa o cordillera de los Maribios (INETER, 2011, p.4).

El punto más elevado de la cuenca Tisma Apoyo Manares le corresponde a la cima del volcán Mombacho 1344 m.s.n.m, le sigue el volcán Masaya el cual alcanza una altura de 632 m.s.n.m. La parte más baja es la superficie del Lago de Cocibolca 31.5 m.s.n.m. En el extremo oeste de la parte interna de la cuenca en mención, se encuentra el complejo de los volcanes Masaya y Apoyo, en el límite sur, el volcán Mombacho se encuentra en elevación, formando parte de la cadena volcánica del Pacífico de Nicaragua. Presenta una evolución geológica dinámica y aún no ha alcanzado la estabilidad (INETER, 2011, p.5).

Hidrogeología

Según Guatemala (2007) señala que, los acuíferos más significativos de Nicaragua se sitúan en las formaciones cuaternarias de la planicie de León-Chinandega, la meseta de Carazo y la depresión nicaragüense, que comprende la cordillera volcánica del Pacífico. En esta región, se registran tasas elevadas de recarga, principalmente debido a la infiltración de las aguas pluviales. Las zonas de descarga se ubican a lo largo de la planicie costera de los lagos Cocibolca y Xolotlán, así como en las costas del Océano Pacífico (p.28).

Guatemala (2007) continúa diciendo que:

> Dentro de la subcuenca hidrográfica Apoyo, se localiza la Laguna de Apoyo, que está ubicada en un acuífero regional extenso y robusto identificado por Krásný (1995) como el grupo acuífero principal, perteneciente al subsistema Acuífero Granada-Tipitapa. Este acuífero es de naturaleza volcánica, con una antigüedad Plio-Pleistocena, principalmente compuesto por la Formación Las Sierras. La zona de descarga a nivel regional es el lago de Nicaragua, que se encuentra a una elevación de 31 metros sobre el nivel del mar.
>
> La Formación Las Sierras, que forma principalmente el Acuífero Granada-Tipitapa abarcando la mayor parte del área de investigación, sirve como la base de la Laguna de Apoyo y emerge en una ubicación en la orilla de la laguna, especialmente en la zona norte a este. La dirección general del flujo subterráneo sigue una trayectoria suroeste-noreste, desde las áreas elevadas de la Meseta de Carazo hasta el Lago de Nicaragua (PROYECTO CEE-ALA., 1992; Krásný, 1995).

Flora

En la subcuenca hidrográfica Apoyo, se encuentran áreas dispersas de bosques que albergan especies de plantas características del bosque seco tropical estacional, abarcando parte del territorio.

La vegetación se clasifica como sabana boscosa, con la existencia de especies como: Quebracho (*Pithecellobium arboreum (L.) Urban)*, Guayacán *(Guaiacum sanctum L)*, Ceiba (*Ceiba pentandra (L.) Gaertn*.), Guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb*), Pochote *(Pachira quinata (Jacq.) Dugand.)*, Genízaro (*Pithecellobium saman*, *Albizia saman (Jacq.)* Muell.) y alrededor de 50 tipos de árboles que producen frutas. Asimismo, se desarrollan flores de Sacuanjoche (*Plumeria rubra f. acutifolia*) y Sardinillo (*Tecoma stans).*

Fauna

En la región de estudio, se pueden encontrar diversas especies animales, como ardillas, armadillos, venados, monos, chocoyos, palomas, urracas, carpinteros, iguanas, entre

otros. Es destacable la presencia de una colonia de chocoyos, conocidos como pericos verdes del Pacífico, que anidan en los escarpados farallones del volcán Masaya. Esta especie de chocoyos constituye la única población documentada que ha tenido que adaptarse a la inhalación de gases volcánicos.

La diversidad de especies animales en el área de estudio demuestra la importancia de preservar este entorno, ya que alberga una rica variedad de vida silvestre. La presencia de adaptaciones únicas, como la de los chocoyos al inhalar gases volcánicos, resalta la singularidad y fragilidad de los ecosistemas locales. La conservación de estas áreas no solo beneficia a la biodiversidad, sino que también contribuye a la investigación científica y al entendimiento de cómo algunas especies se adaptan a entornos extremos.

Suelo

Los suelos que conforman la subcuenca hidrográfica Apoyo son de origen volcánicos conformados por lavas, cenizas y lodo volcánico. En la figura 6, se pueden visualizar los distintos tipos de suelo que se encuentran en la región, siendo así los suelos Mollisols con un área de 158 km^2, Entisols con 93 km^2, Alfisols con 9 km^2 y Andisols 1 km^2, representando el 55.83%, 32.86%, 3.18% y 0.35% de la zona de investigación respectivamente, los cuales se detallan a continuación:

Mollisols. Estos suelos presentan tonalidades oscuras y están enriquecidos con altos niveles de materia orgánica, conforme a su definición etimológica. Son suelos de textura suave y bien estructurada, no mostrando dureza ni masividad en condiciones secas. Sus horizontes típicos son: A-Bt-C-R, aunque pueden variar según el grado de desarrollo del suelo, el cual está vinculado al nivel evolutivo del proceso de génesis del suelo (INETER, 2021, p.45).

En Nicaragua, estos suelos son comunes en climas secos y subhúmedos, y se originan principalmente a partir de materiales geológicos básicos, como rocas volcánicas o sedimentos en áreas de acumulación (INETER, 2021, p.45).

Entisols. Suelos recién formados con escaso o nulo desarrollo de horizontes o capas. La secuencia común de horizontes es A-AC-R o A-R, generalmente de carácter muy superficial. Se localizan en áreas de pendientes, superficies afectadas por erosión y

depósitos recientes, y pueden desarrollarse en diversos climas y regímenes de humedad del suelo. Estos suelos presentan variados usos del suelo (INETER, 2021, p.44).

Alfisols. Estos suelos son más avanzados en su desarrollo evolutivo en comparación con los Mollisols. Se distinguen por tener colores claros y horizontes subsuperficiales con tonalidades amarillentas, rojizas o rojas amarillentas, dependiendo del régimen climático en el cual se han formado. La secuencia típica de horizontes para los Alfisols es A-Bt-C-R (INETER, 2021, p.45).

Estos suelos tienden a ser profundos a moderadamente profundos, y su característica morfológica distintiva, además de las propiedades químicas, es la presencia de horizontes argílicos o kándicos (INETER, 2021, p.45).

Andisols. Suelos característicos de origen volcánico por excelencia. Se originan a partir de cenizas, vidrios volcánicos y otros materiales piroclásticos, presentando tonalidades oscuras. Estos suelos son altamente porosos, ligeros, permeables, poseen una buena estructura y son fácilmente manejables (INETER, 2021, p.44).

Estos suelos presentan una secuencia típica de horizontes propia de suelos jóvenes, como A-Bw-C-R. Su alta productividad se debe a su fertilidad, aunque requieren suplemento de fósforo. La profundidad varía de moderada a significativa, dependiendo de la pendiente del terreno en el cual se encuentren (INETER, 2021, p.44).

En la figura 7, se pueden visualizar los tipos de texturas determinados en el área de investigación, siendo así Franco Arcilloso con un área de 238.48 km^2, Franco Limoso con 18.30 km^2, Arcillo Arenoso con 3.37 km^2 y Franco Arenoso 0.85 km^2, representando el 84.27%, 6.47%, 1.19% y 0.30% del área respectivamente.

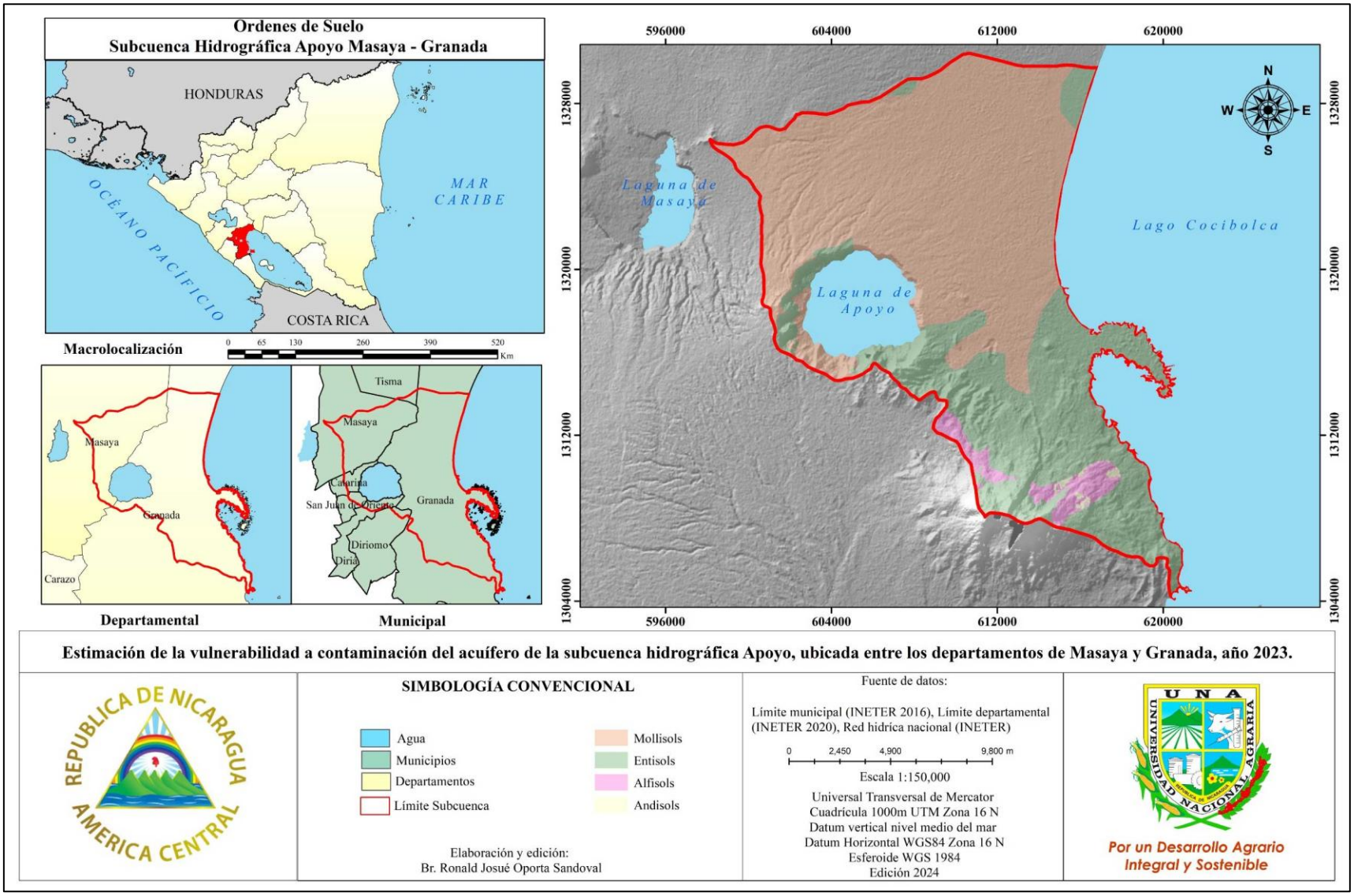


Figura 6. Mapa de los órdenes de suelo presentes en el área de estudio

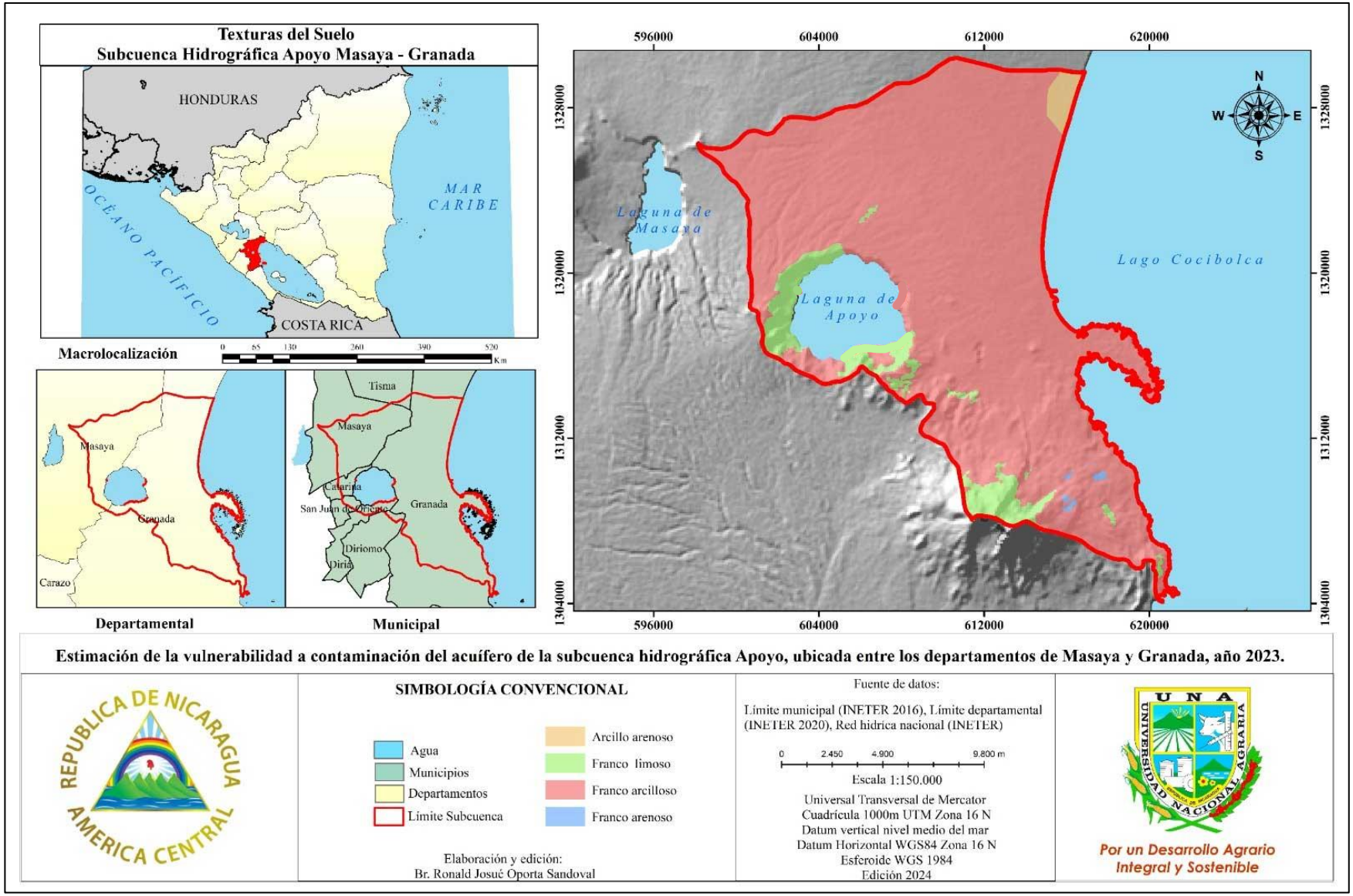


Figura 7. Mapa de las texturas del suelo presentes en el área de estudio

4.3.Proceso metodológico

La presente investigación se desarrolló en tres etapas: a) Etapa de planeación, b) Etapa de campo y c) Etapa de gabinete, descritas a continuación:

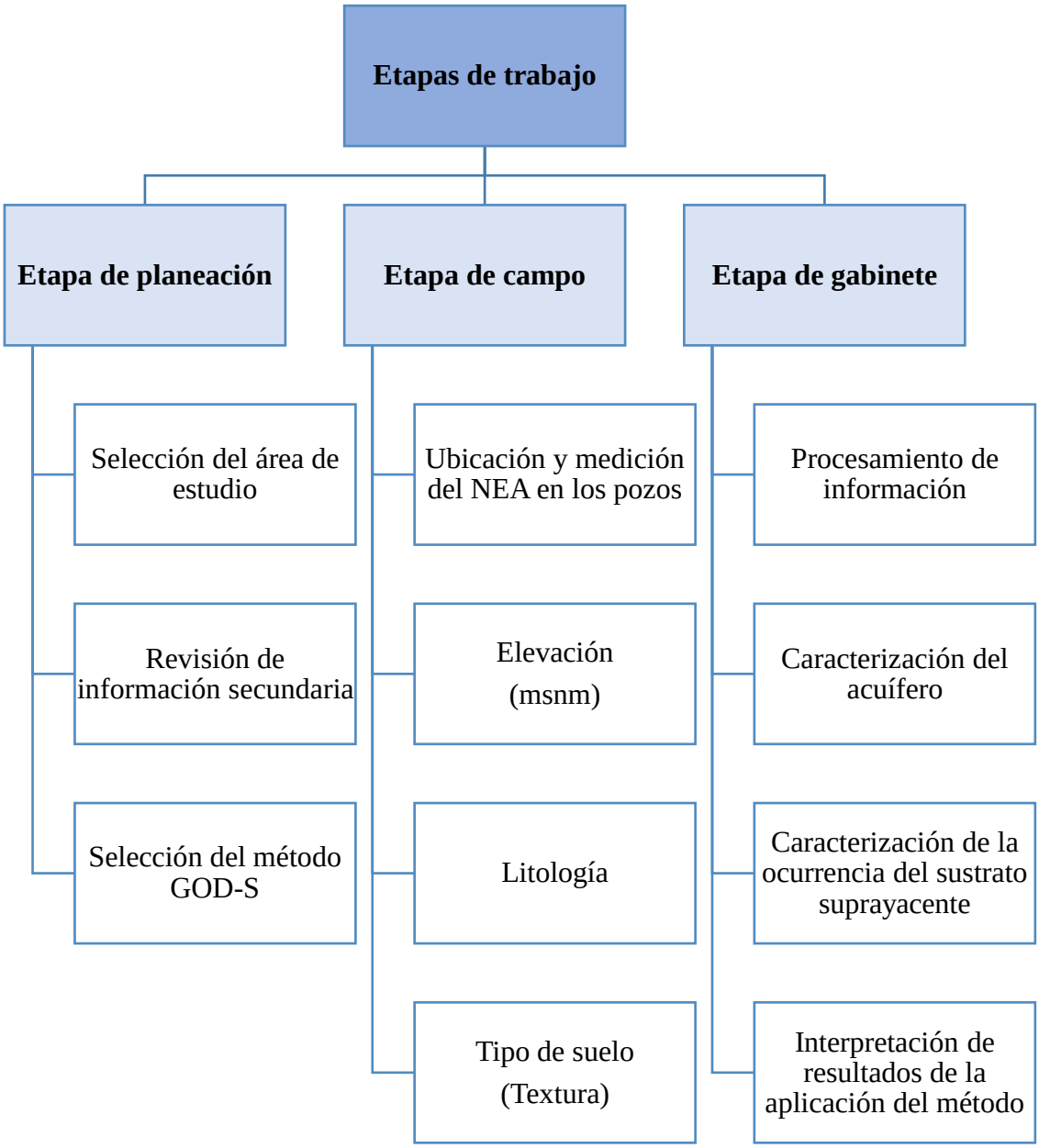


Figura 8. Esquema metodológico del trabajo de investigación

a) Etapa de planeación

La etapa inicial de este proceso involucró la elección del área de investigación, la revisión de datos secundarios y la selección del método de evaluación más apropiado. La información consultada abarcó estudios hidrogeológicos, mapas temáticos históricos y análisis sobre la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación mediante diversos enfoques, utilizando bases de datos geoespaciales en formatos tanto vectoriales como ráster, como se muestra en la figura 9.

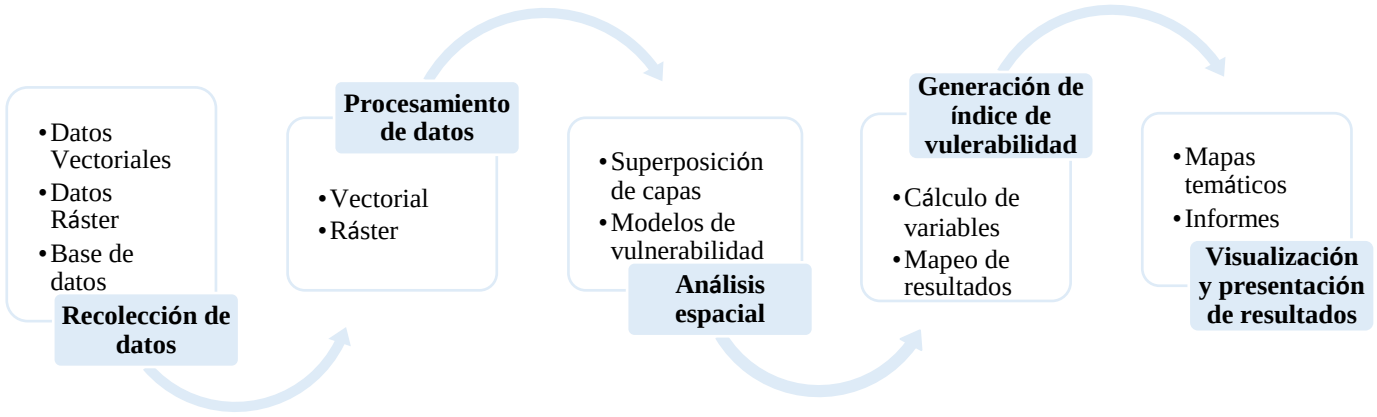


Figura 9. Diagrama metodológico sobre análisis de vulnerabilidad de los acuíferos

En términos generales, estos datos se emplearon principalmente con fines de caracterización hidrogeológica del área. Sin embargo, para una gestión efectiva de los recursos de agua subterránea, es esencial llevar a cabo una evaluación tanto del riesgo intrínseco como del nivel de vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación.

En el contexto de esta investigación, se optó por la metodología GOD, desarrollada por Foster en 1987. Esta elección se fundamenta en su simplicidad y capacidad para generar una evaluación integral del acuífero, basada en sus condiciones intrínsecas. Además, esta metodología se adapta de manera efectiva a la calidad de la información disponibles y resulta fácil de implementar en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En el caso de la aplicación del método seleccionado para estimar la vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo, se utilizó el método GOD-S modificado, el cual utiliza los tres parámetros básicos planteados por FOSTER 1987, para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación; este método fue

modificado por la Universidad Católica de Chile 1996 donde introduce el parámetro S que tiene en cuenta las características texturales de los suelos, definidas con criterio agrológico.

Este método es una herramienta técnica desarrollada para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, con el objetivo de proteger y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos subterráneos

b) Etapa de campo

El enfoque GOD-S se fundamenta en el análisis integrado de cuatro variables clave: la presencia de agua subterránea (G = Groundwater occurrence), la clasificación general del acuífero (O = Overall aquifer class), la profundidad hasta el nivel freático (D = Depth) y el tipo de suelo (S = Soil type). Estos factores buscan replicar las condiciones del terreno que pueden facilitar o mitigar el desplazamiento de agua y contaminantes desde la superficie hacia el acuífero (Banco Mundial, 2002, p.23).

Está etapa fue crucial para recopilación de la información específicas que se requieren para el desarrollo del método, estos se adoptaron a las condiciones locales de la subcuenca hidrográfica Apoyo, lo que permite una estimación precisa de la susceptibilidad del acuífero. En la figura 10 se observa la medición del nivel estático del agua subterránea (NEA), con ayuda de la sonda piezométrica.

Figura 10. Medición del nivel estático del agua subterránea

La estimación de la distancia del nivel estático del agua subterránea con respecto a la superficie, se basó en mediciones georreferenciadas realizadas en 43 pozos para el año 2023. Estos datos facilitan el análisis de la relación entre la profundidad del nivel estático del agua subterránea del acuífero y las elevaciones del terreno circundante, recopiladas en esta etapa de la investigación y posteriormente la información fue procesada y analizada, como se representa en la figura 11.

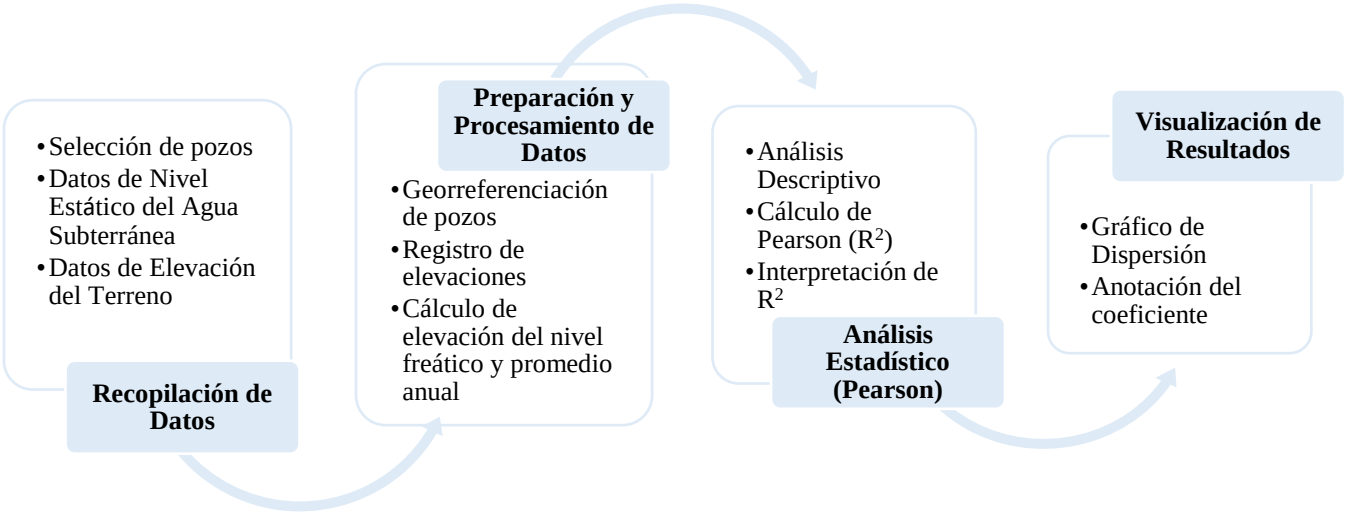


Figura 11. Diagrama metodológico sobre análisis de relación del NEA y relieve

En la figura 12, se presentan texturas identificadas para los cuatro ordenes de suelos presentes en el área de la subcuenca hidrográfica, utilizando el método basado en el tacto propuesto por el por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA (1999).

Franco Limoso

Arcilla no Expansiva

Figura 12. Determinación de textura del suelo

Para determinar el grado de confinamiento del acuífero y la permeabilidad del estrato suprayacente, se deben considerar las condiciones de porosidad y las capas confinantes de la litología presente en la zona de estudio. Para ello, se analizaron siete perfiles litológicos de pozos, obtenidos durante su perforación y distribuidos a lo largo de la subcuenca. Además, se analizaron resultados de pruebas de bombeo a descarga libre para identificar los tipos de acuíferos presentes.

Los perfiles litológicos proporcionan información esencial sobre la composición y la estructura de las capas del subsuelo, permitiendo evaluar la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua del acuífero. Por su parte, las pruebas de bombeo ayudan a medir la respuesta del acuífero a la extracción de agua, proporcionando datos sobre su capacidad de recuperación y la permeabilidad de las capas adyacentes.

En la Figura 13, se presentan las formaciones geológicas reportadas para la zona, las cuales son cruciales para entender la dinámica hidrogeológica y la interacción entre las diferentes capas del acuífero. Estos datos combinados permiten una evaluación más precisa del sistema acuífero y su capacidad para suministrar agua de manera sostenible.

Formación Las Sierras

Cuaternario Aluvial

Figura 13. Formaciones Geológicas

c) Etapa de gabinete

En esta etapa se realizó el procesamiento de la información primaria recolectada en campo y de esta manera generar los productos para desarrollar el método GOD-S. En este sentido se elaboraron diferentes mapas temáticos como el de la ubicación del área de estudio, ordenes de suelo, tipos de acuíferos, formaciones geológicas, profundidad del agua subterránea, curvas piezométricas y dirección del flujo, así como el mapa de vulnerabilidad a contaminación del acuífero.

También se efectuó una correlación de entre las mediciones realizadas en los pozos y la elevación del terreno ya que este resultado puede proporcionar una comprensión integral de la dinámica de las aguas subterránea, permitiendo evaluar su vulnerabilidad con mayor precisión y desarrollar estrategias efectivas de protección y gestión sostenible.

Para el desarrollo de la metodología GOD-S los datos recolectados fueron clasificados y de la misma manera recibieron valoraciones entre 0 y 1, teniendo en cuenta su variación en el espacio y su potencial impacto en la susceptibilidad del acuífero a la contaminación. En la figura 14, se presenta el esquema del método para la asignación de las puntuaciones o valores de cada una de las variables y los grados de valoración numérica de los parámetros.

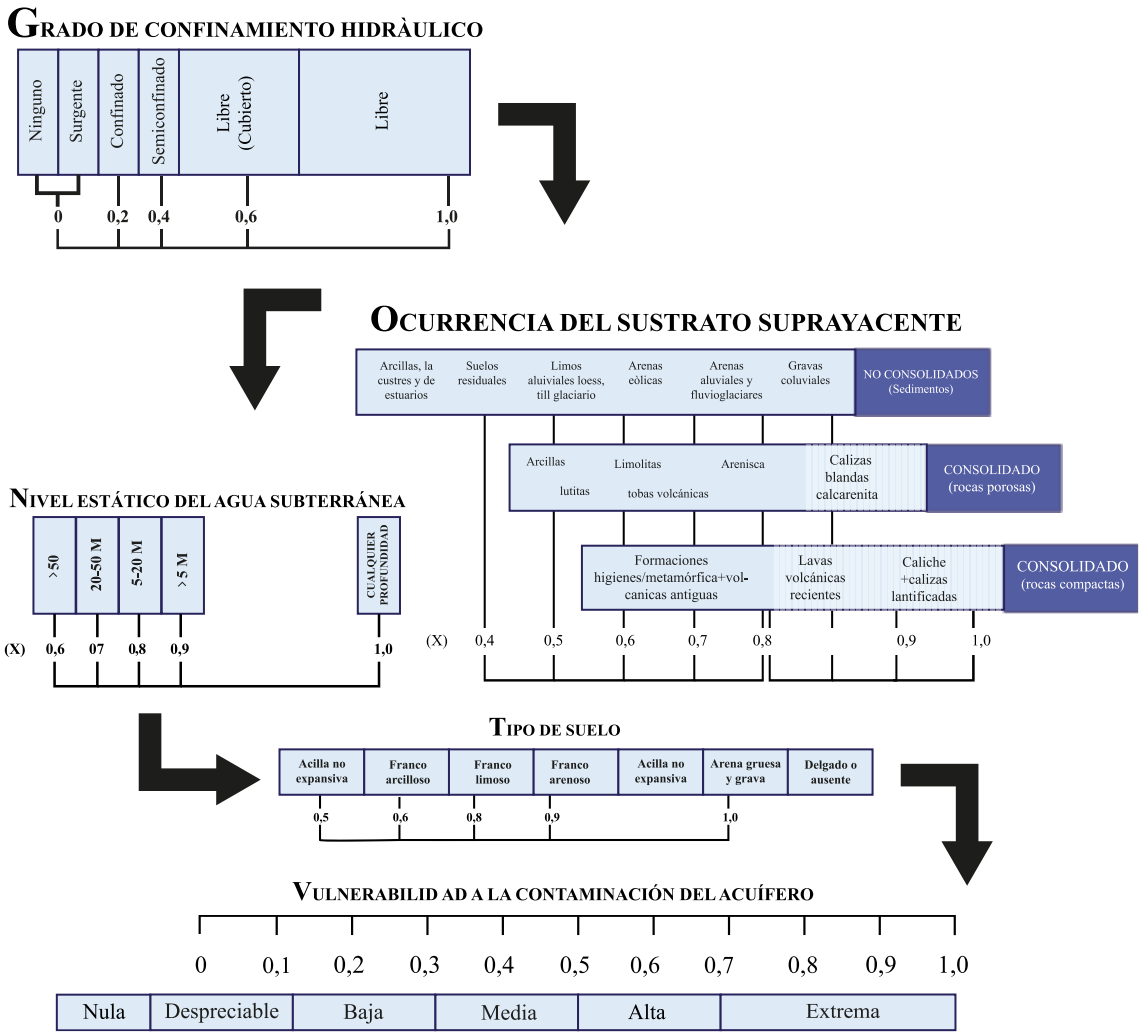


Figura 14. Método GOD-S para la evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de acuíferos

El procesamiento de la información se ejecutó mediante el software ArcGIS 10.8. Durante este procedimiento, se asignaron valores predefinidos a todos los datos, los cuales se convirtieron posteriormente a formato ráster para su combinación mediante operaciones de álgebra de mapas. El esquema para la generación del mapa de vulnerabilidad se muestra en la Figura 15.

Este enfoque de procesamiento de datos es esencial para obtener una representación detallada y precisa de la vulnerabilidad en el acuífero de la subcuenca hidrográfica, logrando una efectiva visualización de la información geoespacial.

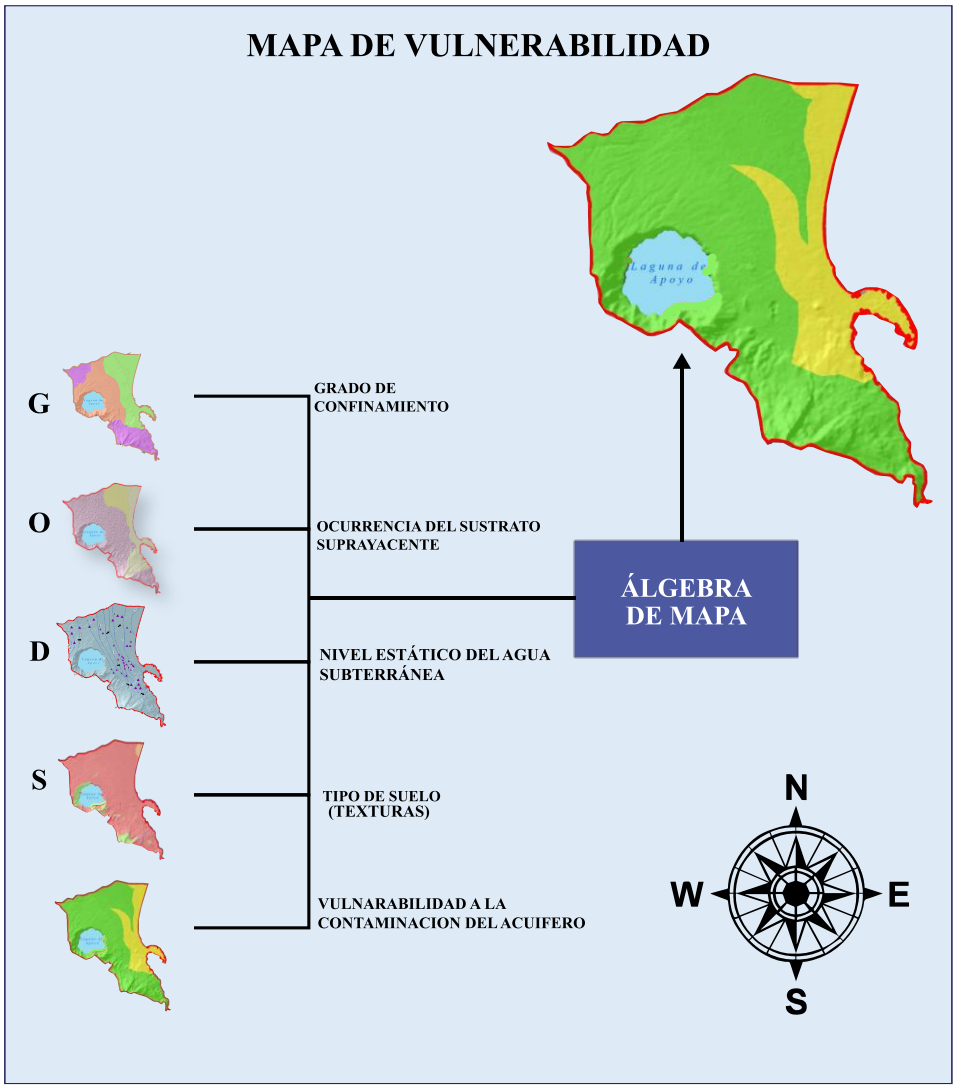


Figura 15. Generación del mapa de vulnerabilidad a contaminación de acuíferos utilizando el método GOD-S

La fase final comprendió el análisis y detallada descripción de los resultados obtenidos, abarcando la estimación de la vulnerabilidad a contaminación general del acuífero de la subcuenca hidrográfica Apoyo. También se analizó la influencia de los factores en este proceso y se interpretó la información del mapa piezométricos determinando la dirección del flujo de descarga del acuífero.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.Formaciones geológicas u ocurrencia del sustrato suprayacente

La zona de estudio está compuesta por depósitos de origen volcánico, la litología se compone principalmente por rocas volcánicas, sedimentos recientes y consolidados. En la subcuenca predomina la formación Grupo Las Sierras 147.8 km^2, Cuaternario Aluvial 84.9 km^2 y Cuaternario Residual 28.3 km^2, abarcando el 52.23%, 30% y 10% del área de investigación respectivamente, representado en la figura 19.

5.1.1. Formación Las Sierras (TQps)

La Formación Las Sierras, que data del periodo Plio-Pleistoceno, se compone principalmente de depósitos piroclásticos, incluyendo tobas de origen pumiceas y lapilli. Estas unidades volcánicas cuaternarias forman parte de la actividad volcánica más reciente a lo largo del margen del pacifico en Nicaragua. Donde destacan los depósitos volcánicos del Apoyeque, Masaya, Mombacho y Apoyo, depósitos piroclásticos de composición tobácea, pómez, lapilli, aglomerados, flujo de lodo y lavas.

Figura 16. Formación Grupo Las Sierras TQps

5.1.2. Sedimentos aluviales (Qal)

Estos depósitos sedimentarios se encuentran alineados de manera paralela al Graben o Depresión Nicaragüense, compuestos por bolones y gravas formadas por clastos subangulares y subredondos, dentro de un matriz limo arcillo arenosa con una granulometría que varía de media a fina. En la superficie, prevalecen materiales con una fina estratificación, como limo arcilloso arenoso, lo que convierte la zona en extensas áreas dedicadas al cultivo de granos básicos, en particular arroz. Estos sedimentos tienen su origen en la descomposición de rocas sedimentarias del periodo Terciario.

Esta formación geológica se observa en el área que se extiende desde El Paso de Panaloya hacia la ciudad de Granada y se extiende hacia las plantaciones de arroz en el extremo noroeste del poblado de Panaloya.

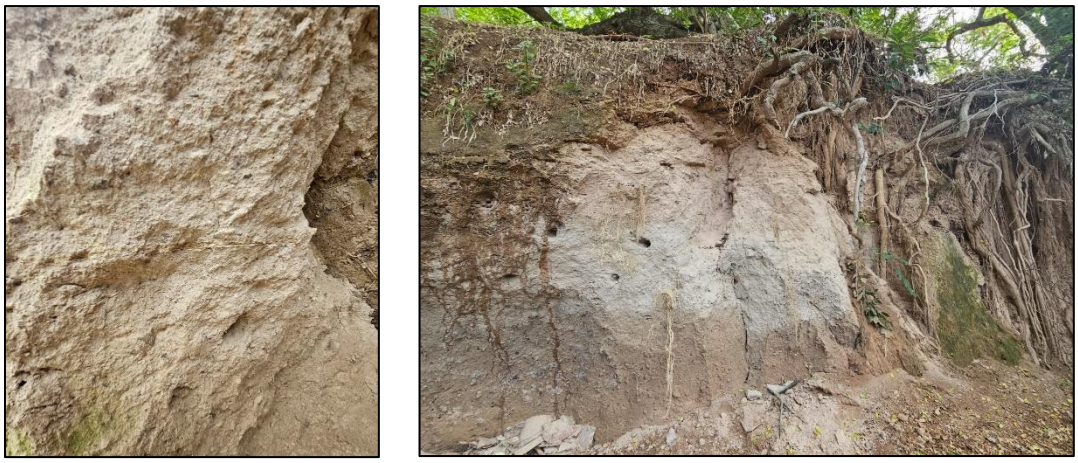


Figura 17. Formación Cuaternario Aluvial Qal

5.1.3. Cuaternario residual (Qr)

En estas áreas de suelos se concentra la principal actividad agrícola, caracterizada por secciones que varían de limo a limo arcilloso con un color pardo oscuro. Estos suelos muestran una concentración de pisolitos redondeados y diminutos fragmentos de pómez. La formación de estos sedimentos residuales se atribuye al proceso de meteorización y la influencia del agua sobre las cenizas volcánicas, como ocurre en las áreas donde se extienden los mantos de pómez en la región.

Figura 18. Formación Cuaternario Residual Qr

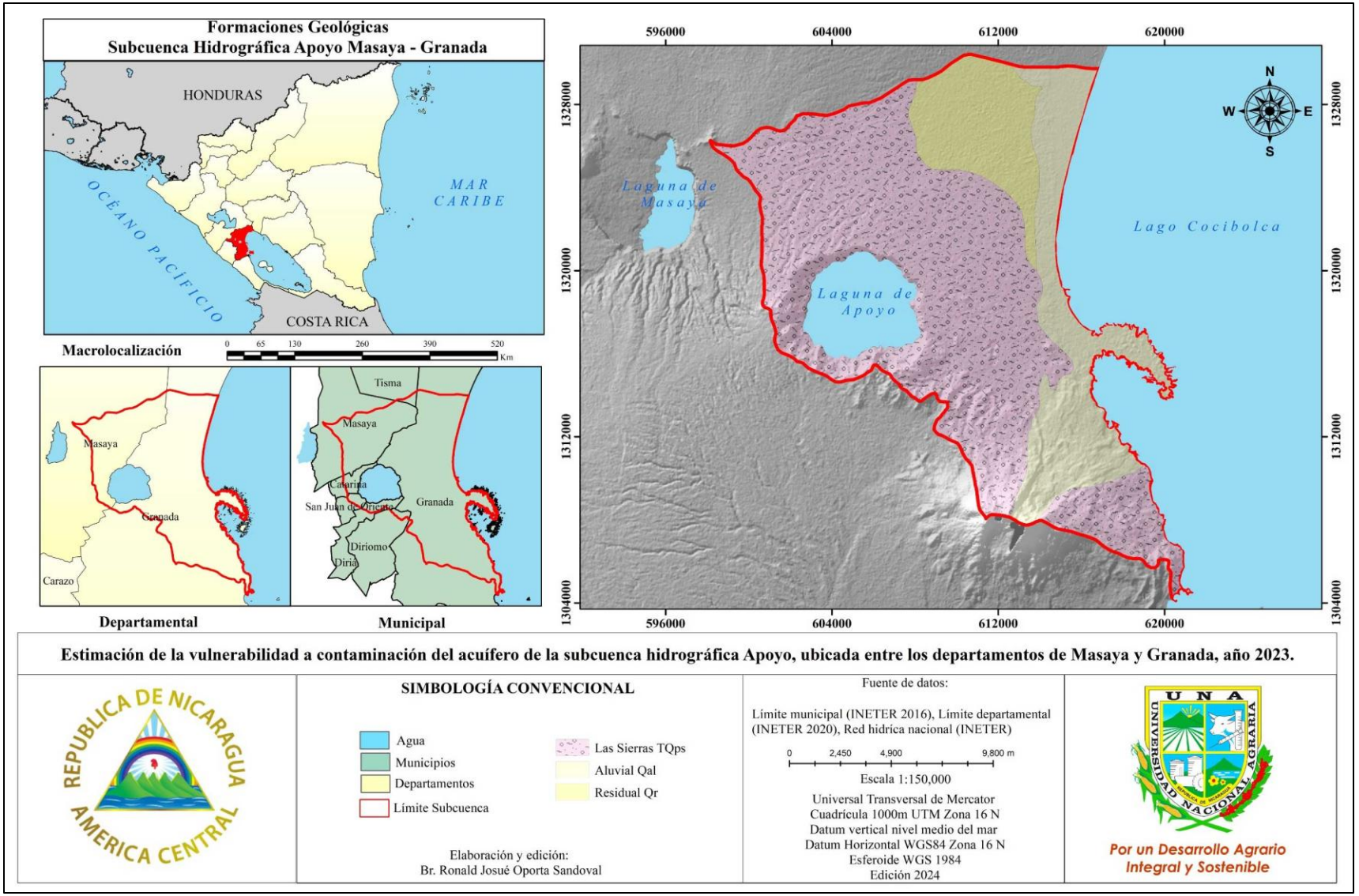


*Figura 19***.** Mapa de las formaciones geológicas

5.2.Características hidrogeológicas del área de estudio

En términos generales, las condiciones geológicas predominantes en el área propician la formación de acuíferos predominantes como libre, semiconfinado y en menor proporción confinado. Esto se debe a que los depósitos volcánicos no consolidados crean un medio físico poroso y permeable que facilita, tanto el almacenamiento, como la circulación del agua. La siguiente tabla resume las características de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio, definidas por Krásný en el año 1995.

Cuadro 2. *Características hidrogeológicas de las formaciones geológicas*

N	Nomenclatura	Periodo	Serie	Formación	**Características hidrogeológicas** (Krásný, 1995).			
					Transmisividad (m^2/d)	Rango de Transmisividad	Caudal Especifico ($m^3/h/m$)	Caudal Especifico (l/s/m)
1	Qr	Cuaternario	Holoceno	Residual	100<T<600	Moderada	3,6-36	1-10
2	Qal	Cuaternario	Holoceno	Aluvial	100<T<1000	Alta	36	10
3	TQps	Terciario-Cuaternario	Pliopleistoceno	Las Sierras	8<T<540	Baja a moderada	0,04-3,6	0,01-0,1

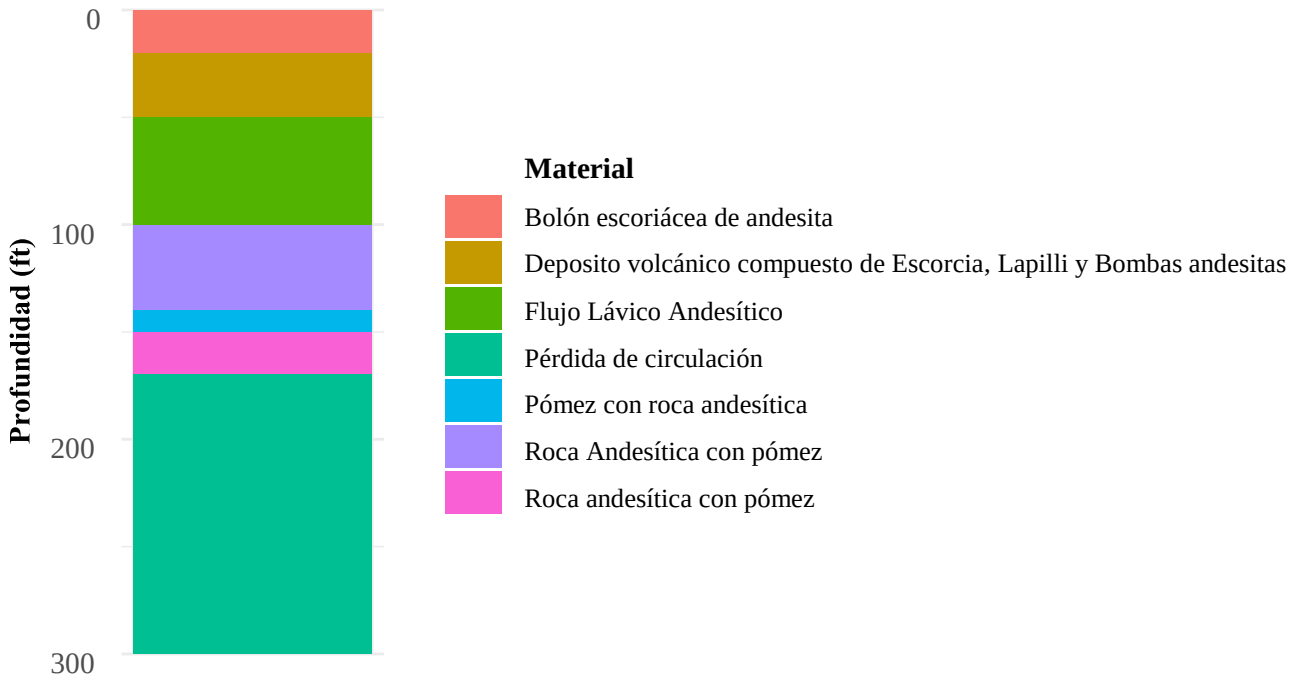
5.3.Grado de confinamiento del acuífero

Para estimar la vulnerabilidad, es de gran importancia tener información sobre el grado de confinamiento hidráulico y nivel de consolidación del estrato superior o capas confinantes del acuífero, ya que estos aspectos están vinculados principalmente a las propiedades intrínsecas de las diversas formaciones geológicas presentes en la región.

Para la clasificación del nivel de confinamiento del acuífero de la subcuenca, fue esencial entender la estructura de siete perfiles litológicos de pozos perforados (ver anexo 9), la naturaleza de los materiales presentes y analizar resultados de pruebas de bombeo realizadas a descarga libre; con el fin de clasificar el acuífero en términos de su confinamiento en tres categorías principales:

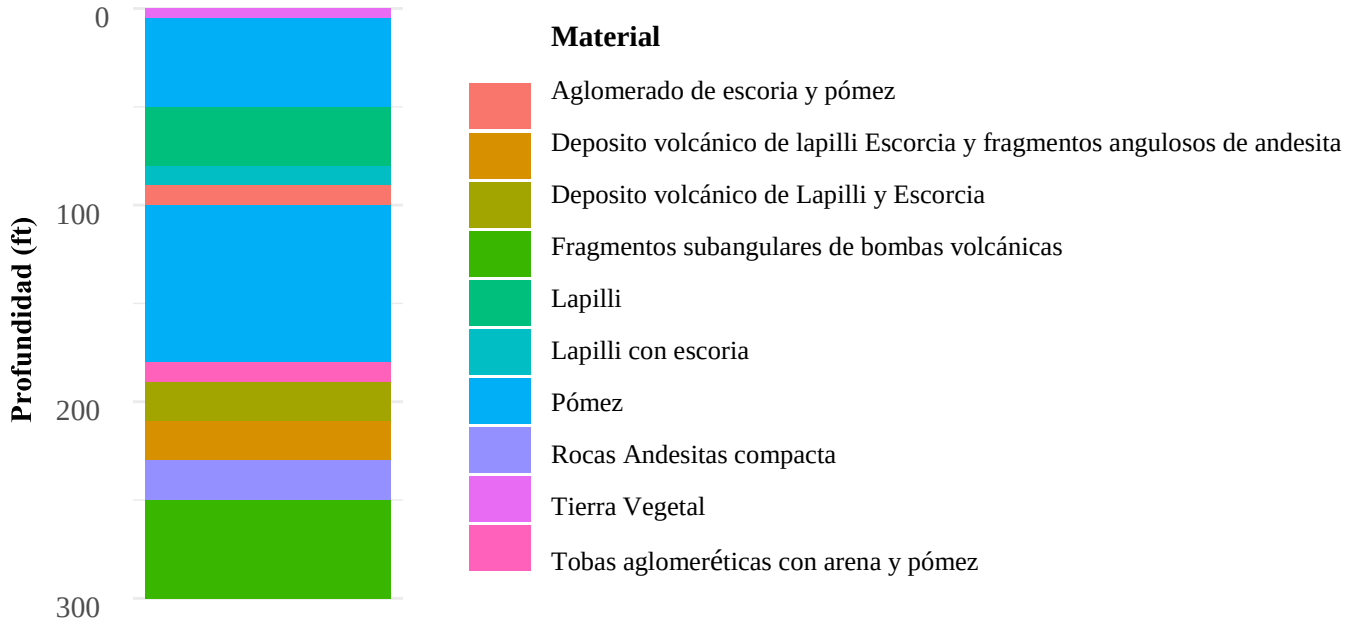
1. Acuífero libre (no confinado): el agua está en contacto directo con la atmósfera a través de materiales permeables.
2. Acuífero confinado: el agua está atrapada entre dos capas de materiales de baja permeabilidad.
3. Acuífero semiconfinado: tiene características de ambos tipos anteriores, con una permeabilidad intermedia.

Figura 20. **Perfil Litológico N.º 1**



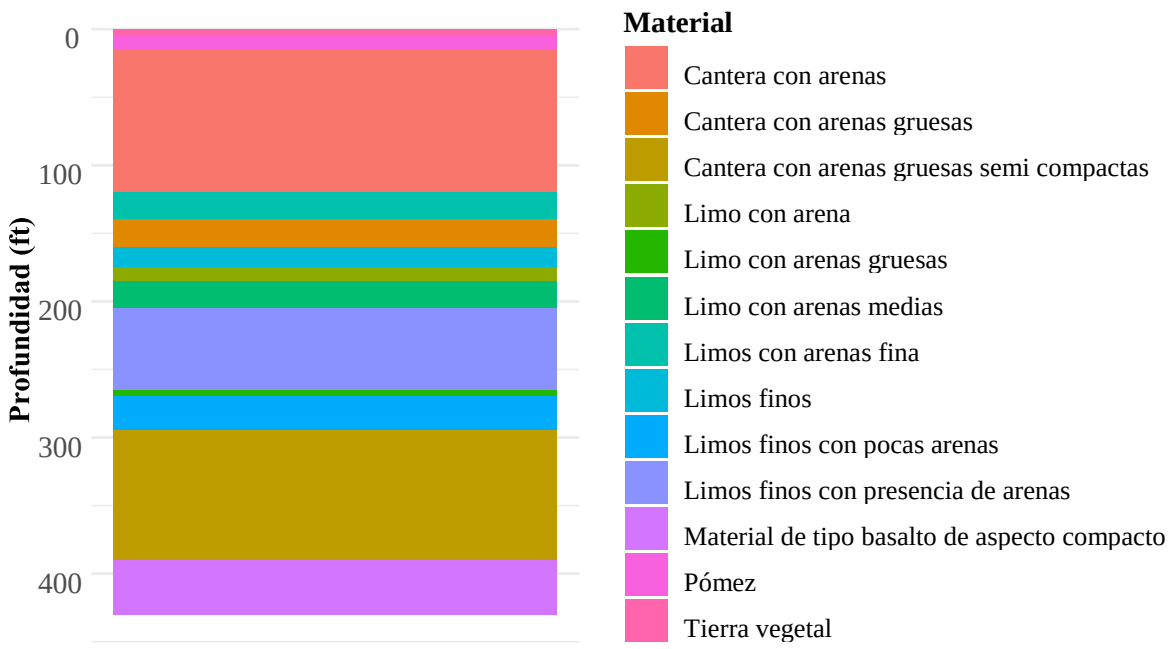
El perfil geológico, revela diferentes niveles de confinamiento y permeabilidad en las capas del subsuelo. Desde los 0 hasta los 20 pies, y entre los 20 y 50 pies, podemos encontrar bolón escoriáceo de andesita y depósitos volcánicos compuestos, respectivamente, ambos con permeabilidad moderada y no confinados. De 50 a 100 pies, el flujo lávico andesítico muestra baja permeabilidad y está confinado. Entre 100 y 170 pies, las capas transicionales de roca andesítica con pómez varían en permeabilidad moderada a alta y pueden ser semi-confinadas. Finalmente, de 170 a 300 pies, la pérdida de circulación sugiere una permeabilidad muy alta y no confinada. Estos hallazgos indican que las capas superiores y las más profundas permiten mayor flujo de agua, mientras que la capa intermedia actúa como una barrera impermeable, con secciones transicionales que ofrecen permeabilidad intermedia.

Figura 21. **Perfil Litológico N.º 2**



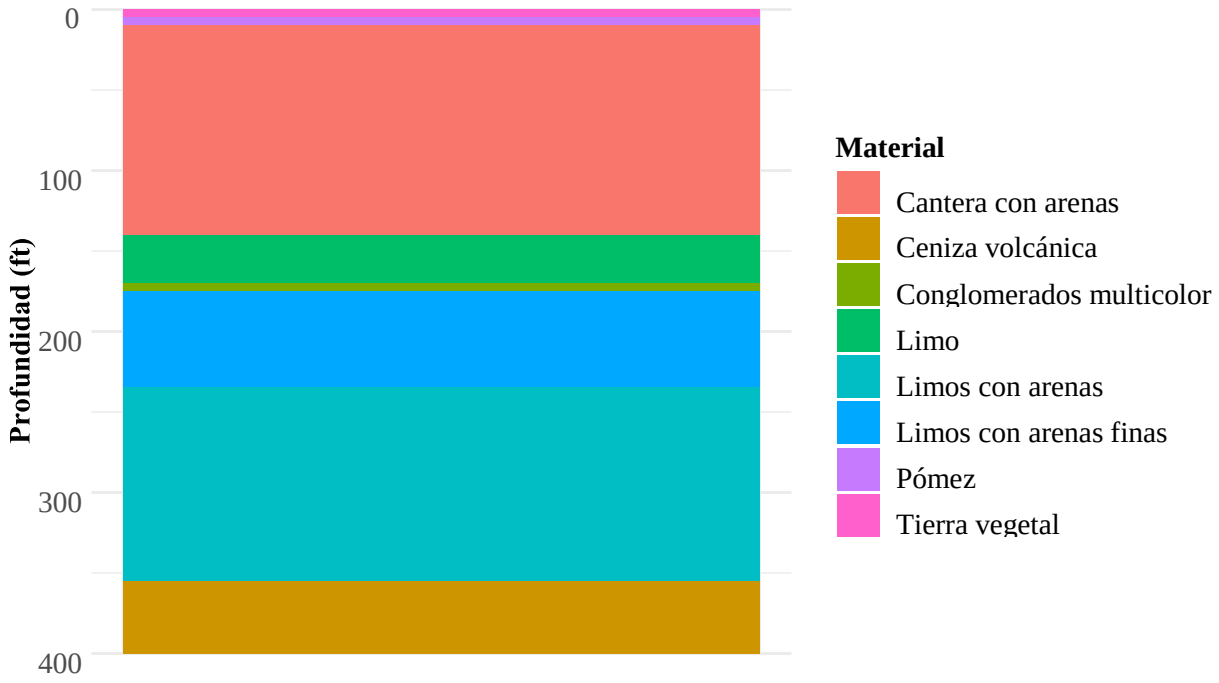
Este perfil representa un acuífero principalmente libre desde la superficie hasta los 230 pies, compuesto por capas de tierra vegetal, pumita, lapilli, y depósitos volcánicos que permiten un flujo de agua moderado a alto. Desde los 230 pies hasta los 300 pies, la presencia de rocas andesíticas compactas y fragmentos subangulares de bombas volcánicas indica una disminución significativa en la permeabilidad, creando un nivel de confinamiento que sugiere la existencia de un acuífero confinado. Las rocas andesíticas compactas (230-250 pies) actúan como una barrera clave que confina el agua en los estratos inferiores. En resumen, el perfil geológico indica un sistema acuífero libre en la mayoría de las capas superiores, mientras que las capas profundas presentan características de confinamiento debido a la baja permeabilidad de los materiales presentes.

Figura 22. **Perfil Litológico N.º 3**



El perfil geológico, presenta una secuencia de capas con diferentes niveles de permeabilidad y confinamiento, lo que resulta en una clasificación de acuífero libre y semi-confinado a confinado. Desde la superficie hasta los 140 pies, encontramos capas compuestas de tierra vegetal, pome, y cantera con arenas, todas altamente permeables y permitiendo el flujo libre de agua. Entre los 140 y 170 pies, el limo actúa como una barrera de baja permeabilidad, funcionando como una capa semi-confinante. De 170 a 355 pies, las capas de conglomerados multicolor, limos con arenas finas y limos con arenas presentan una permeabilidad variable, creando condiciones de acuíferos semi-confinados a confinados. Finalmente, desde los 355 hasta los 400 pies, la ceniza volcánica altamente permeable forma un acuífero libre.

Figura 23. **Perfil Litológico N.º 4**

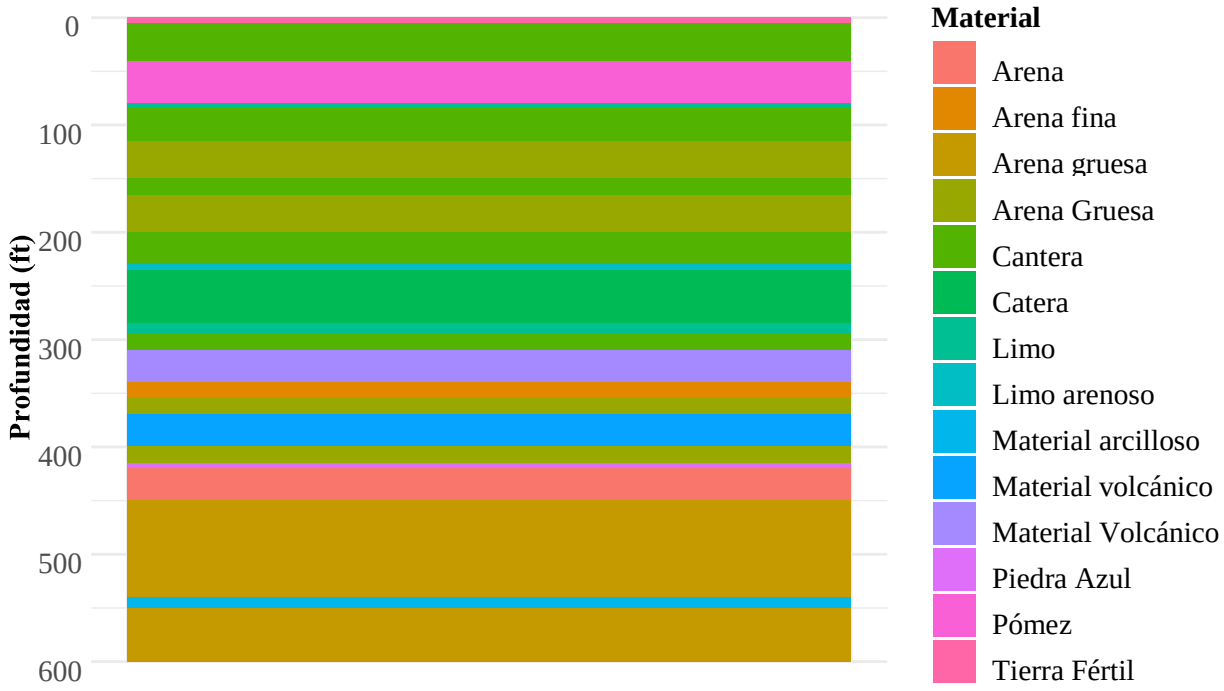


Este perfil revela la presencia de un acuífero libre entre los 15 y 120 pies, donde la cantera con arenas proporciona alta permeabilidad. Entre los 140 y 160 pies, y de 295 a 390 pies, se identifican acuíferos confinados debido a la presencia de capas de limos y basalto que actúan como barreras impermeables. Los limos entre los 120-140 pies y 160-175 pies, así como entre los 270-295 pies, junto con el basalto compacto entre los 390-430 pies, crean zonas de baja permeabilidad que confinan el agua.

Figura 24. **Perfil Litológico N.º 5**

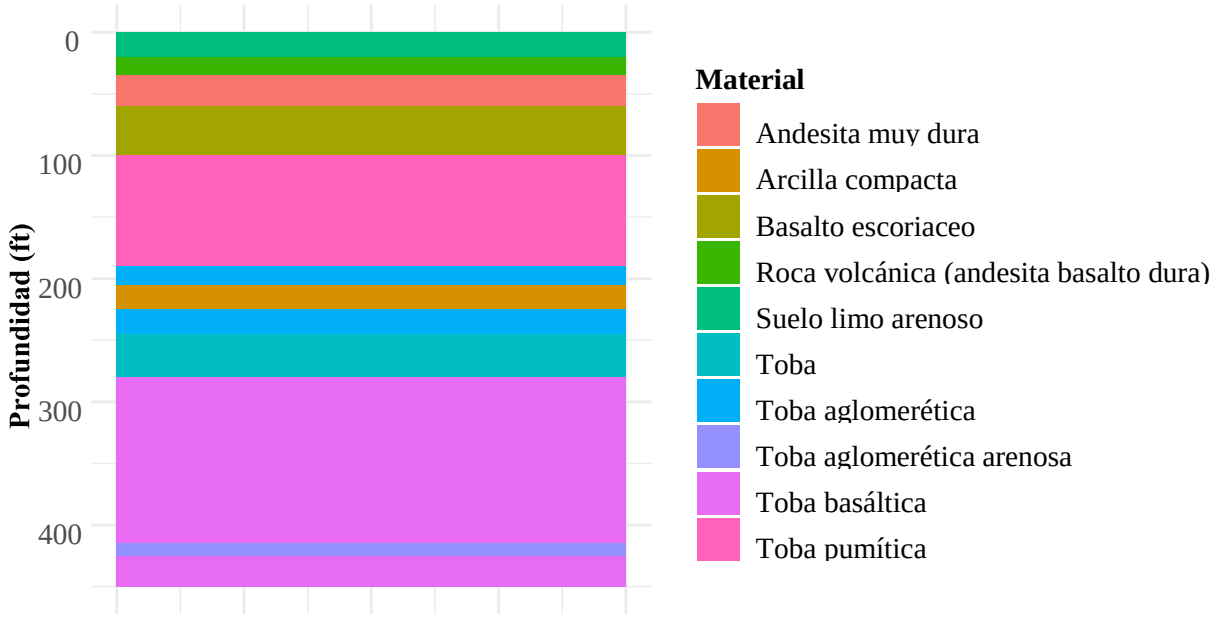
El perfil geológico muestra una predominancia de capas no confinadas de alta a moderada permeabilidad, formadas por pómez, lapillis, y sus combinaciones, extendiéndose desde la superficie hasta los 330 pies. La pómez, con su alta permeabilidad y las mezclas de lapillis y escoria permiten un flujo de agua libre. La ceniza consolidada con poca arena (190-210 pies) y la toba aglomerética con arena y pómez (220-250 pies) presentan condiciones semi-confinadas debido a su menor permeabilidad. La roca andesita compacta entre los 349-359 pies actúa como una capa confinante debido a su muy baja permeabilidad, impidiendo el flujo de agua. Las capas de fragmentos de bombas volcánicas (359-395 pies) tienen una permeabilidad baja a moderada, creando condiciones semi-confinadas. En síntesis, la estructura geológica indica una serie de acuíferos libres, intercalados con capas semi-confinadas y una capa confinante de roca andesita.

Figura 25. **Perfil Litológico N.º 6**



El perfil permito identificar y clasificar los acuíferos en dos categorías principales: acuíferos libres y acuíferos confinados, en función de su posición y las capas que los rodean. El acuífero libre, como la capa de arenón grueso entre 115 y 150 pies, se encuentran en las capas superiores sin capas confinantes directamente encima, lo que permite un flujo de agua relativamente libre. Por otro lado, el acuífero confinado esta encapsulado entre capas de cantera, limo, material volcánico, piedra azul entre otros que actúan como barreras impermeables entre 150 y 420 pies, restringiendo el movimiento del agua subterránea. La mayoría del acuífero de este perfil es un acuífero confinado, destacándose la capa de arenón grueso como el único acuífero libre significativo.

Figura 26. **Perfil Litológico N.º 7**



Este perfil revela que el potencial hidrogeológico sugiere la formación de un acuífero principalmente confinado. Donde las capas permeables como el suelo limo arenoso, el basalto escoriacco, y diferentes tipos de toba (pumítica, aglomerética, basáltica) están intercaladas entre capas impermeables como la andesita dura y la arcilla compacta. Estas capas impermeables actúan como confinantes, manteniendo el agua en las capas permeables bajo presión. Por lo tanto, aunque algunas capas permeables podrían considerarse semiconfinadas dependiendo de la configuración local, la presencia de múltiples capas impermeables indica que el acuífero predominante en este perfil es confinado.

De acuerdo con las características de las capas confinantes de los perfiles descritas anteriormente, resultados del coeficiente de almacenamiento de pruebas de bombeo realizadas en dichos pozos, se determinó el grado o nivel de confinamiento hidráulico del acuífero del área de estudio. Resultando que 93.31 km^2 de la subcuenca tiene un nivel de confinamiento hidráulico libre, representando el 32.98%, 119.63 km2 del área es semiconfinado, representando el 42.27% y solo 48.06 km^2 es confinado, representando el 16.98%. Esto indica que las capas de las formaciones geológicas del acuífero son relativamente permeables. Ver figura 20. Donde se muestran los tipos de acuíferos presentes.

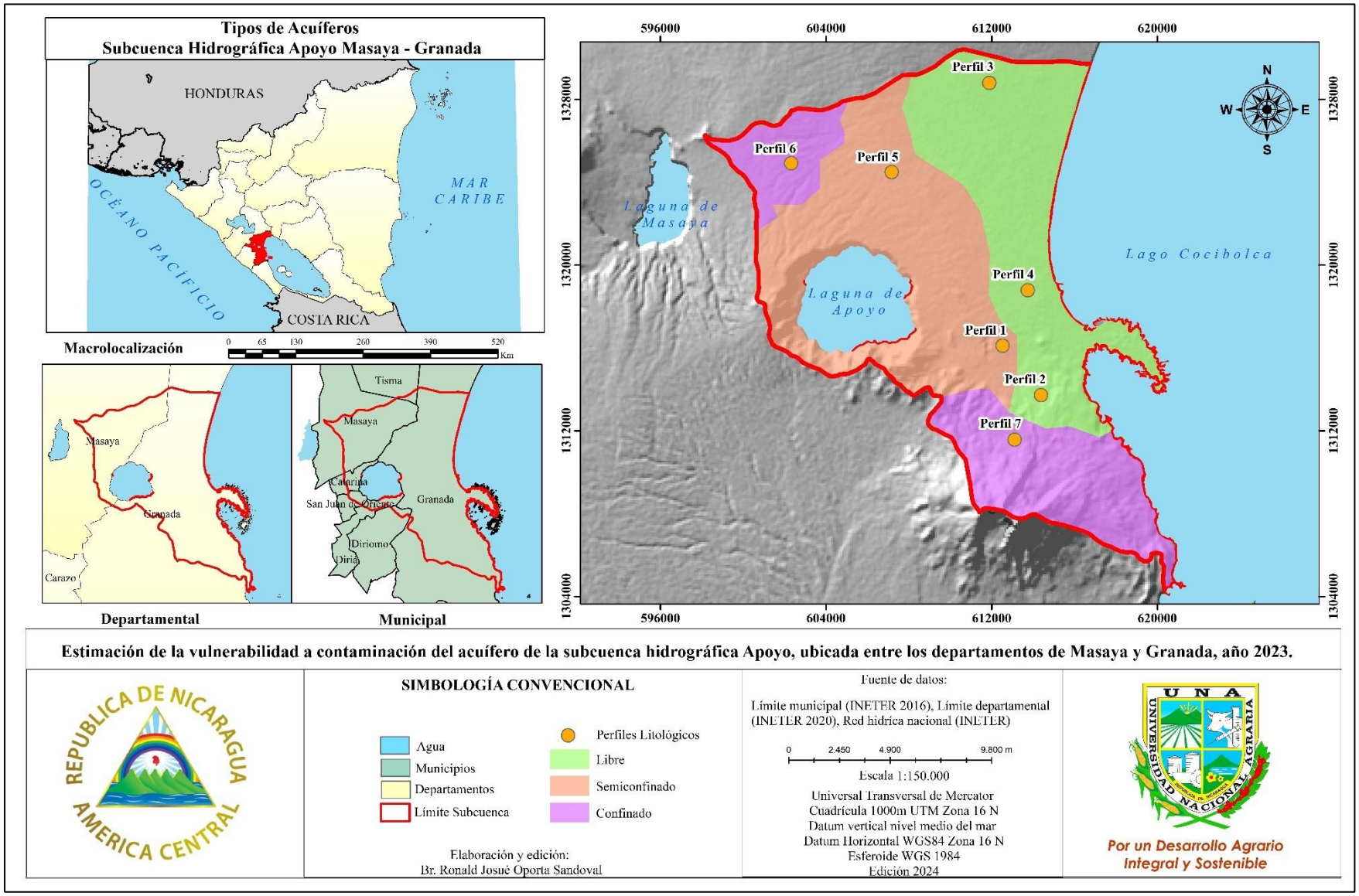


Figura 27. Mapa de los tipos de acuíferos

5.4.Distancia del nivel estático del agua subterránea

Se evalúo la distancia o profundidad del nivel estático del agua subterránea con respecto a la superficie del terreno. En este contexto, los acuíferos poco profundos son más propensos a la contaminación, ya que los contaminantes recorren una distancia menor para llegar al agua subterránea. Este análisis considera las características geológicas y la litología específica del área de estudio.

Con el fin de evaluar la vulnerabilidad en relación al nivel estático freático, se elaboró un mapa que refleja los niveles estáticos del agua subterránea, obtenido mediante la correlación entre las mediciones promedio anual realizadas en los pozos y la elevación del terreno. La figura 21, exhibe el resultado de esta correlación, mostrando un coeficiente R^2 del 63 %, lo que indica una relevancia significativa entre las variables consideradas y valida que el modelo es adecuado y confiable para aplicar. Nivel estático del agua subterránea en mts.

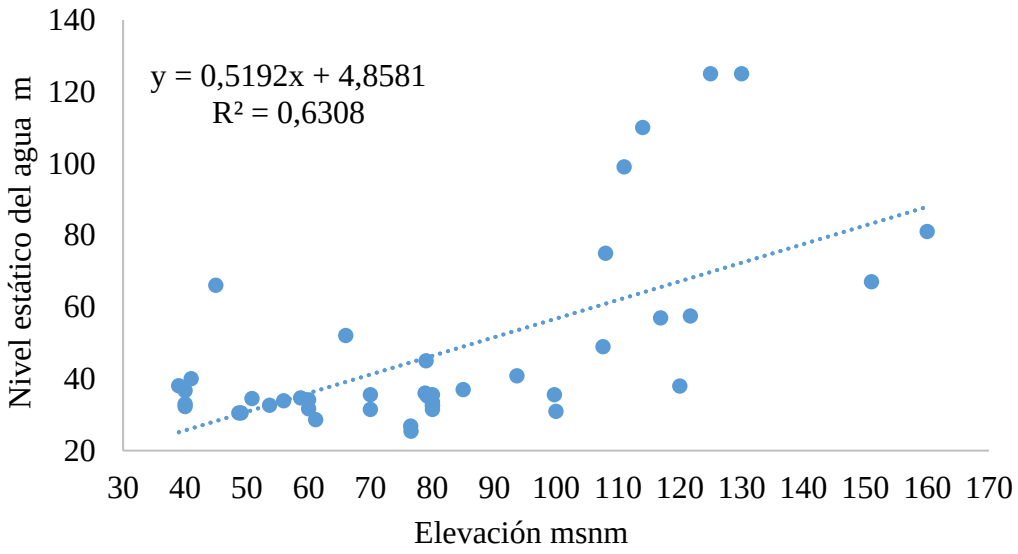


Figura 28. Coeficientes de correlación niveles estáticos del agua subterránea con respecto a la elevación

En la figura 22, se observan las curvas piezométricas de 10 pisos altitudinales con una separación de 5, 10, 15 y 25 metros, las cuales representan la distancia en que se encuentra el nivel estático de agua subterránea promedio con respecto a la superficie, obtenidas a través de mediciones realizadas en los 43 pozos monitoreados en el año 2023.

En esta área se encuentra la mayor parte de comunidades que conforman el área de estudio como La Ciudad de Masaya, La Ceibita, El Comején No. 1, El Comején No. 3, Los Cocos, Las Flores, El Edén, La Poma No. 2, Pacayita, Quebrada Honda, La Reforma, Pacaya, Diriomito, Valle La Laguna, El Hatillo, El Chilamate, La Laguna, El Capulín No, 2, Buena Vista, Santa Elena, Las Prusias, Veracruz, El Hormigón, La Fuente, El pochote Tepeyac, El Mombacho y los rangos de profundidad de los niveles estáticos del agua subterránea oscilan entre los 75 – 150 m con respecto a la superficie.

El Comején No. 4, Las Flores, La Reforma, La Garza, El Chilamate, Las Cortezas, Llano Grande No. 1, Llano Grande No. 2, La Bolsa, Santa Clara, Gancho La Mona, San Blas, El Capulín No. 1, Capulín No. 2, La Laguna, Las Prusias, Ciudad de Granada, El Pochote, El Hormigón, Tepeyac, y El Mombacho, donde la profundidad del agua subterránea del acuífero oscila entre 50 – 74 m con respecto a la superficie.

En la formación Cuaternario residual y aluvial se encuentran las comunidades como: Los Malacos, Cauola, El Capulín No. 1, El Fortín, Ciudad de Granada, Playa Grande, Posintepe y El Mombaco, la distancia del nivel estático del acuífero oscila entre 30 – 49 m con respecto a la superficie.

Dirección del flujo del agua subterránea

El método GOD-S, no considera determinar la dirección del flujo del agua subterránea, sin embargo, se convierte en un factor de relevancia significativo para determinar el desplazamiento de la carga de sustancias contaminantes y su potencial impacto en las áreas circundantes ante una eventualidad.

Krasny & Hecht, (1998) "Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacifico de Nicaragua", describe los sistemas de acuíferos donde se menciona en el sub sistema acuífero Granada-Tipitapa a la Laguna Apoyo indicando que está en una de las dos zonas de descarga hacia el acuífero de Granada. La zona de descarga de la Laguna Apoyo es directa hacia el Lago Cocibolca, sin embargo, su zona de recarga es de poca extensión; cerca de la Laguna en la parte occidental y meridional.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el patrón de curvas piezométricas obtenidas concuerda con la zona de descarga de la Laguna Apoyo, ya que proporciona tres posibles direcciones del flujo de agua subterránea, todas convergen en un mismo punto de descarga, el cual corresponde al gran Lago de Nicaragua, también conocido como el "Cocibolca".

Estas tres direcciones son las siguientes: a) de oeste hacia el norte, con destino al Lago Cocibolca; b) de oeste a este, en dirección al Lago Cocibolca; y c) de oeste a sur, también con rumbo al Lago Cocibolca, como se puede apreciar en la figura 22.

Comprender estas posibles rutas de flujo es esencial, para evaluar de manera adecuada el desplazamiento y dirección de la pluma contaminante ante la ocurrencia de un evento; además de aportar insumos para la formulación de estrategias, para una adecuada gestión orientada a la protección de los recursos hídricos, así como para tomar decisiones relativas a la planificación del territorio.

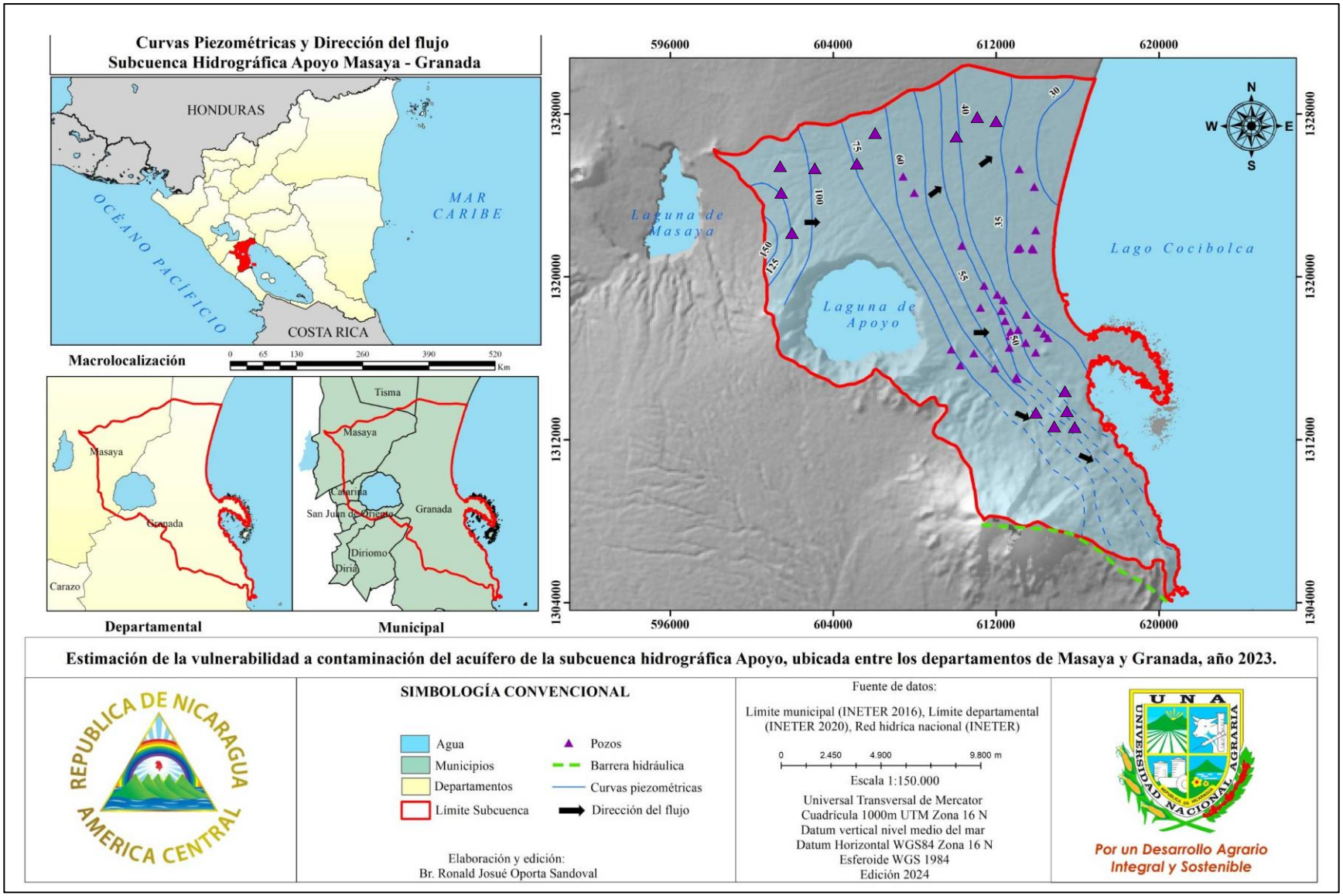


Figura 29. Mapa de curvas piezométricas y dirección del flujo

5.4. Vulnerabilidad a contaminación del acuífero

La metodología GOD-S, utiliza un índice cuantitativo para clasificar la vulnerabilidad, el cual se obtiene a partir de evaluaciones cualitativas. La multiplicación combinada de estos parámetros determino el nivel de vulnerabilidad y permitió ilustrarlo en un mapa que divide el área de estudio en dos categorías de vulnerabilidad: media y baja.

El Cuadro No 3, presenta una tabla que resume el cálculo de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la subcuenca hidrográfica Apoyo. A continuación, se proporciona una descripción detallada de cada categoría de vulnerabilidad, incluyendo su ubicación geográfica y las características hidrogeológicas que la definen.

Cuadro 3. *Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero de acuerdo con el método GOD-S*

N	Formación Geológica	Grado de confinamiento hidráulico G		Ocurrencia del sustrato suprayacente O		Distancia al nivel del agua subterránea D		Tipo de suelo "Textura" S		Vulnerabilidad a contaminación del acuífero	
1	Cuaternario Residual Qr		Puntación		Puntación		Puntación		Puntación		Valoración Global
		Libre	1	Sedimentos consolidados (más antiguos) y recientes, arcillas	0.4	50 - 55 50 - 35	0.6 0.7	Franco Arcilloso	0.6	Baja	0.1
			Puntación		Puntación		Puntación		Puntación		Valoración Global
2	Cuaternario Aluvial Qal	Libre Confinando	1 0.2	Sedimentos recientes: gravas y arenas,	0.7	30 – 50 55 - 100	0.7 0.6	Franco Arcilloso Franco Limoso Arcillo Arenoso Franco Arenoso	0.6 0.8 0.5 0.9	Media Baja	0.3 0.3 0.2 0.1

N	Formación Geológica	Grado de confinamiento hidráulico G		Ocurrencia del sustrato suprayacente O		Distancia al nivel del agua subterránea D		Tipo de suelo "Textura" S		Vulnerabilidad a contaminación del acuífero	
3	Grupo Las Sierras TQps		Puntación		Puntación		Puntación		Puntación		Valoración Global
		Semiconfinado	0.4	Rocas volcánicas: tobas y cenizas compactas	0.8	50 - 150	0.6	Franco Arcilloso	0.6	Baja	0.1
		Confinado	0.2					Franco Limoso	0.8		0.1
								Franco Arcilloso	0.6		0.1
								Franco Arenoso	0.9		0.1

Vulnerabilidad baja

Las zonas de vulnerabilidad baja incluyen el área de 60.25 km^2, correspondiente al 21.29% de toda el área, conforma por las siguientes comunidades: La Ciudad de Masaya, La Ceibita, El Comején No. 1, El Comején No. 3, El Comején No. 4, Los Cocos, Las Flores, Llano Grande No. 1, Llano Grande No. 2, La Gaza, Gancho La Mona, San Blas, La Bolsa, Santa Clara, Las Cortezas, El Edén, La Poma No. 2, Pacayita, Quebrada Honda, La Reforma, Pacaya, Diriomito, Valle La Laguna, El Hatillo, El Chilamate, La Laguna, El Capulin No, 2, Buena Vista, Santa Elena, Las Prusias, Veracruz, El Hormigón, La Fuente, El pochote Tepeyac, El Mombacho, Ciudad de Granada, El Capulín No. 1, Cauloa, Los Malacos. Perteneciente a los departamentos de Masaya y Granada.

Esta área es conformada por la formación Grupo Las Sierras y Cuaternario Residual compuestas por sedimentos consolidados (más antiguos) y recientes, arcillas; rocas volcánicas como tobas y cenizas volcánicas. El suelo predominante en esta área es el Mollisols, Entisols y Alfisols con texturas franco-arcilloso y franco-limoso. Así mismo la mayor parte del acuífero es semiconfinado y confinado, donde la profundidad del nivel estático del agua subterránea en su mayoría se encuentra en el rango de 51 – 150 m.

La presencia de diversas capas en esta área, como tierra vegetal, bolón escoriáceo de andesita, depósitos volcánicos compuestos de pómez, lapillis, ceniza consolidada con poca arena, cantera, limo, material volcánico, piedra azul, suelo limo arenoso, basalto escoriáceo, y diferentes tipos de toba (pumítica, aglomerética, basáltica), todas con permeabilidad baja a moderada, dificultando el flujo libre del agua. Esta baja permeabilidad actúa como una barrera natural, reduciendo la velocidad a la que el agua puede moverse a través de estas capas, por esta razón limita la capacidad de cualquier contaminante para llegar al acuífero.

Adicionalmente, el nivel estático del agua subterránea se encuentra más profundo con respecto a la superficie. Esta mayor profundidad añade otra capa de protección, ya que cualquier sustancia derramada en la superficie tendría que atravesar múltiples capas de suelo y roca, cada una con su propia capacidad de adsorción y filtración, antes de alcanzar el acuífero; convirtiéndolo menos susceptible a la contaminación.

Vulnerabilidad media

Las zonas de vulnerabilidad media a contaminación del acuífero comprenden el área de 200.75km^2, correspondiente al 70.74% del área de la subcuenca hidrográfica Apoyo. Se conforma de las siguientes comunidades: Los Malacos, Cauloa, El Fortin, El Capulin No. 1, Ciudad de Granada, El Pochote, Playa Grande Posintepe, Tepeyac y El Mombaco. Perteneciente al departamento de Masaya y Granada.

La mayor parte de esta área es conformada por la formación Cuaternario Aluvial compuesta por sedimentos recientes como gravas y arenas. Los suelos predominantes son Mollisols, y Alfisols con textura franco-arcilloso y arcillo-arenoso. Así mismo el acuífero es libre (no confinado), donde las profundidades del agua subterránea oscilan entre los 30 – 50 m.

La geología de esta área presenta varias capas incluyendo tierra vegetal, pumita, lapilli, pómez, cantera con arena y depósitos volcánicos. Todas estas capas son altamente permeables, lo que facilita un flujo libre de agua de moderado a alto. Esta permeabilidad significa que el agua puede moverse fácilmente a través de estas capas, llevándose consigo cualquier contaminante que encuentre en su camino.

Además, el nivel estático del agua subterránea se encuentra cerca de la superficie, lo que incrementa aún más la vulnerabilidad del acuífero. Cuando el nivel freático es superficial, cualquier sustancia derramada en la superficie o cercana a ella tiene menos distancia para recorrer antes de alcanzar el acuífero.

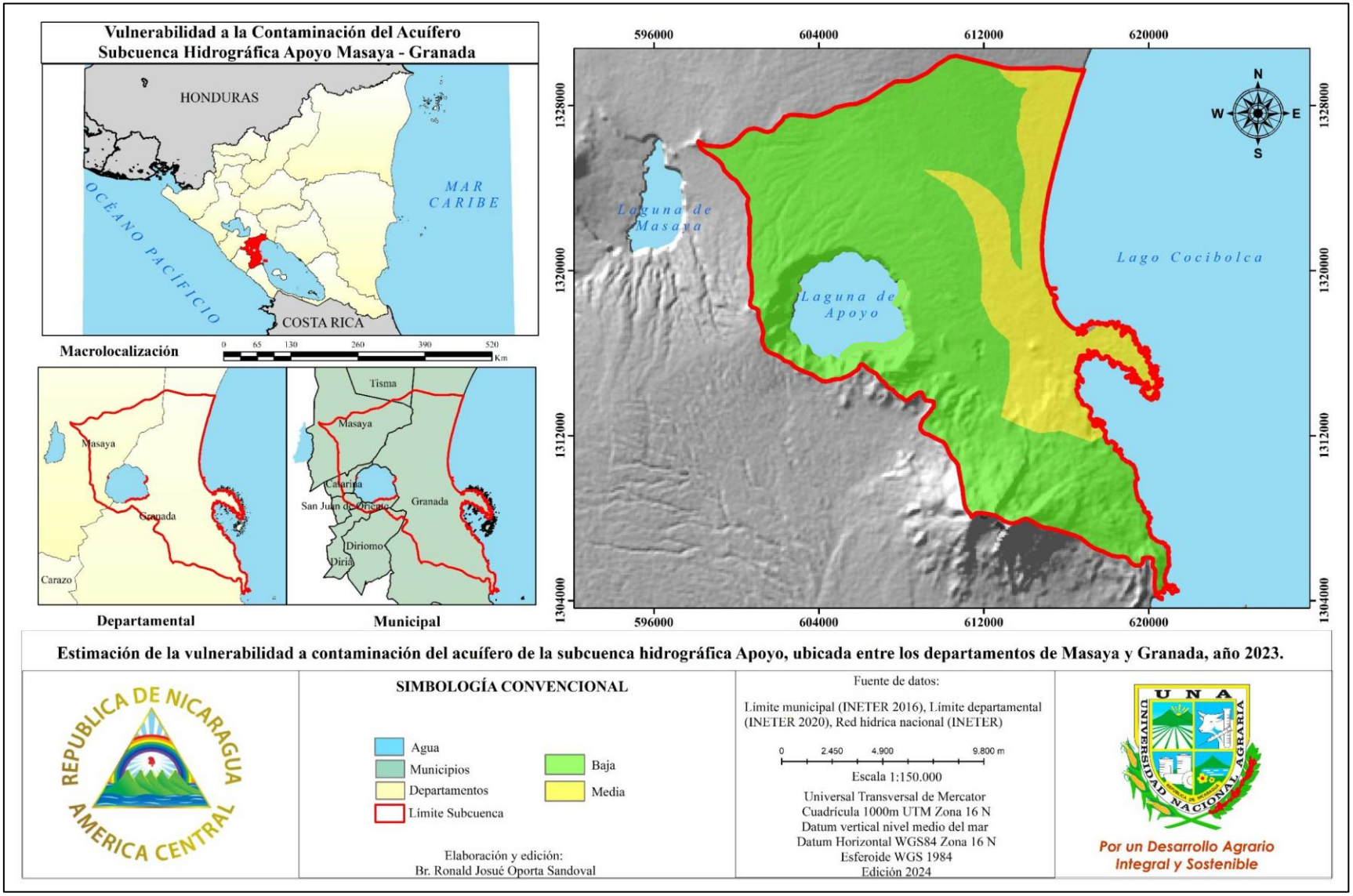


*Figura 30***.** Mapa de vulnerabilidad a contaminación del acuífero

VI. CONCLUSIONES

Las formaciones geológicas presentes corresponden al Grupo Las Sierras del Terciario-Cuaternario, el Cuaternario Aluvial y el Cuaternario Residual, compuestas por sedimentos recientes y consolidados, además de rocas volcánicas. Estas características geológicas favorecen tanto la recarga de agua subterránea como la infiltración de contaminantes potenciales. Los tipos de suelo que conforman la subcuenca hidrográfica Apoyo incluyen Mollisols, Entisols, Alfisols y Andisols, con texturas predominantes como franco-arcilloso, franco-limoso, arcillo arenoso y franco-arenoso.

El análisis de los perfiles litológicos del área revela que gran parte del acuífero es de tipo libre (no confinado) y semiconfinado, lo que indica una permeabilidad moderada en las capas geológicas. En las zonas cercanas a la Laguna de Apoyo, el nivel del agua subterránea varía entre 55 y 150 metros de profundidad. A medida que se avanza hacia el Lago Cocibolca, la profundidad disminuye, oscilando entre 30 y 54 metros, lo que coincide con la dirección del flujo de descarga del acuífero.

Respecto a la vulnerabilidad del acuífero en la subcuenca, se determinó que el 21.70% del área presenta una vulnerabilidad media, el 70.94% una vulnerabilidad baja, y el 7.7% corresponde a la Laguna de Apoyo.

Aunque la vulnerabilidad del acuífero es un factor clave, no es el único criterio para evaluar el riesgo de contaminación, ya que debe considerarse también la amenaza. Sin embargo, este análisis proporciona un punto de partida fundamental para la caracterización del riesgo y la identificación de áreas críticas. Este conocimiento es esencial para la formulación de estrategias dirigidas a la protección del recurso hídrico, así como para la toma de decisiones en materia social y ambiental.

VII. RECOMENDACIONES

Establecer una red de monitoreo constante de los niveles piezométricos y la calidad del agua subterránea en el acuífero. Esto ayudará a detectar posibles cambios en la calidad del agua y garantizar una respuesta temprana a cualquier contaminación.

Implementar regulaciones y restricciones para algunas actividades que se pueden constituir como amenaza e incrementar el riesgo de contaminación. Esto puede incluir limitaciones en el uso de ciertos productos químicos o prácticas agrícolas, ubicación de fábricas, gasolineras, entre otros.

Desarrollar un plan de gestión integral para el acuífero que incluya medidas de conservación, recarga de aguas subterráneas y acciones para mantener la calidad del agua.

Fomentar la adopción de tecnologías limpias y prácticas sostenibles en las áreas urbanas y rurales que puedan influir en la calidad del agua subterránea.

Integrar la gestión de los acuíferos en la planificación del uso de la tierra, de modo que se evite la expansión desordenada de actividades que puedan aumentar la vulnerabilidad del acuífero a contaminación.

VIII. LITERATURA CITADA

Agüero Valverde, J. y Rosendo Mesalles, P. (2000). *Análisis de vulnerabilidad a contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.* Proceedings.esri.com. https://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuiferoscr.htm

Banco Mundial. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua y autoridades municipales y agencias ambientales*. Worldbank.org. https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf

Buitrago Vallejo L. M. (2015). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el municipio de Funza, Cundinamarca* [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia]. Repository.ucatolica.edu.co. https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/03839746-3e17-4927-a9b7-8755f3b33852/content

Cruz Martínez J. A. (2019). *Caracterización de la vulnerabilidad global a contaminación del acuífero de la microcuenca del municipio de Nagarote. Departamento de León. 2017-2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio.una.edu.ni. https://repositorio.una.edu.ni/3840/1/tnt01c957.pdf

Foster, S., Hirata, R., & Andreo, B. (2013, Julio). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, *21*(7), 1389–1392. https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7

Guatemala Herrera J. L. (2007). *Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en Granada, Nicaragua.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. Repositorio.una.edu.ni. https://repositorio.unan.edu.ni/2393/1/837.pdf

Gutierrez Peña, G. y Arrollo Arrollo, J, (2004). *Determinaciòn de la vulnerabilidad del acuifero del municipio de Santiago de Tolù a la contaminaciòn por saneamiento in situ.* [Tesis de pregrado, Universidad de Sucre]. Repositorio.unisucre.edu.co

https://repositorio.unisucre.edu.co/server/api/core/bitstreams/80870e0a-001c-4bed-86a0-8cd0a6c51bf6/content

INETER. (2011). *Estudio de caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de las subcuencas tisma-apoyo-manares.* Informe interno.

INETER. (2021). *1er Atlas nacional de suelos de la República de Nicaragua 2021*. Ineter.gob.ni. https://www.ineter.gob.ni/mapa/pub/atlassuelo/1erAltasNacionaldeSuelos.pdf

Krásný J. (1995). *Hidrogeología de la Zona Pacífica de Nicaragua, Servicio Geológico Checo - INETER*. Informe interno.

Krasny y Hecht M. (1998). *Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacifico de Nicaragua - INETER*. Informe interno.

Proyecto CEE-ALA. (1992). *Estudio de Reconocimiento Hidrogeológico de la Meseta de San Marcos - Carazo.* Inédito

USDA. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo.* Nrcs.usda.gov. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf

Vargas Quintero M. C. (2010). *Propuesta métodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.* Minambiente.gov.co. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Anexo-40.-Propuesta-metodologica-para-la-evaluacion-de-la-vulnerabilidad-a-la-contaminacion-de-acuiferos-1.pdf

Weather Spark. (2023). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Granada.* Weatherspark.com. https://es.weatherspark.com/y/14922/Clima-promedio-en-Granada-Nicaragua-durante-todo-el-a%C3%B1o

Weather Spark. (2023). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Masaya.* Weatherspark.com. https://es.weatherspark.com/y/14348/Clima-promedio-en-Masaya-Nicaragua-durante-todo-el-a%C3%B1o

IX. ANEXOS

Anexo 1. Formatos para la recolección de información

Datos de campo							
N°	**Fecha**	**Actividad**	**Comunidad**	**Parámetro que medir**	**biofísica de los lugares muestreados**	**Uso del recurso**	**Observaciones**
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Datos de pozos								
N°	**Elevación del pozo en msnm**	**Coordenadas (UTM-WGS)**	**Característica del pozo**		**Punto de referencia PR**	**Profundidad del agua subterránea en invierno**	**Profundidad del agua subterránea en verano**	**Usos del pozo**
			Perforado	Excavado				
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Anexo 2. Inventarió de pozos

N	X	Y	Lugar	Tipo de pozo	NEA msnm
1	607438	1324933	El Capulín	Perforado	57
2	607988	1324130	El Capulín	Perforado	58
3	613143	1325301	San Ignacio	Perforado	33
4	613877	1324425	Hacienda. San José de la Viuda	Perforado	37
5	613951	1322295	PTAR-Granada	Perforado	32
6	613828	1321352	Camino a la Planta de Tratamiento - Granada	Perforado	30
7	613772	1321411	460 m al Norte de la Ciudad de Granada	Perforado	30
8	613181	1321427	La Estancia	Perforado	33
9	613071	1321376	La Estancia	Perforado	34
10	611414	1319571	Valle de Granada	Perforado	41
11	612058	1319131	Valle de Granada	Perforado	25
12	612367	1318866	San Matías	Perforado	27
13	611233	1318493	El Bolsón	Excavado	31
14	612272	1318333	Las Camelias	Excavado	34
15	609806	1316439	La Palmera	Perforado	81
16	610244	1315661	El Hormigón	Perforado	67
17	610913	1316255	km 50 carretera Granada- Nandaime	Perforado	38
18	612445	1317843	km 48 carretera Granada- Nandaime	Perforado	31
19	613481	1318150	Casco Urbano	Perforado	34
20	613082	1317408	El Escudo	Perforado	31
21	612708	1317315	El Escudo	Perforado	36
22	612687	1317095	El Escudo	Perforado	36
23	612654	1316527	Las Puertas	Perforado	35
24	613453	1316766	El Madroño	Perforado	36
25	614043	1317520	Quinta Ena	Perforado	32
26	614356	1317216	Quinta Ena	Perforado	35
27	614547	1317003	Quinta Ena	Perforado	34
28	613949	1316290	El Charco	Excavado	29
29	613003	1315083	La Galera	Perforado	33
30	613034	1315000	La Galera	Perforado	32
31	611941	1315507	Basurero La Joya	Perforado	36
32	610326	1321534	Km.42.5 carretera. Masaya-Granada	Perforado	49
33	603007	1326033	Las Flores	Perforado	99
34	603011	1325009	La Poma Nº 2	Perforado	125
35	603000	1323015	Quebrada Honda	Perforado	125
36	604031	1326020	Los Cocos	Perforado	110
37	606010	1327000	Las Flores	Perforado	75
38	607022	1328010	Llano Grande	Perforado	66
39	611000	1327014	San Blas	Perforado	40
40	612013	1328010	Los Malacos	Perforado	38
41	613005	1328042	Los Malacos	Perforado	37
42	617021	1313000	El Mombacho	Perforado	45
43	617017	1314022	El Mombacho	Perforado	52

Anexo 3. Sitos visitados para el reconocimiento de las formaciones geológicas

N	Formación Geológica	Ubicación	Coordenadas
1	TQps Grupo Las Sierras	Comunidad El Capulin No 1	X: 609546 Y: 1322620
2	Qal Cuaternario Aluvial	Ciudad de Granada	X: 614764 Y: 1320015
3	Qr Cuaternario Residual	Comunidad Los Malacos	X: 613702 Y: 1322546

Anexo 4. Tipos de acuíferos

Tipo de Acuífero	Área en km^2	% de área
Libre	93.31	32.98
Semiconfinado	119.63	42.27
Confinado	48.06	16.98
Laguna de Apoyo	22	7.77
Total	283	100

Anexo 5. Formaciones geológicas

Formación Geológicas	Área en km^2	% de área
TQps Grupo Las Sierras	147.8	52.23
Qal Cuaternario Aluvial	84.9	30
Qr Cuaternario Residual	28.3	10
Laguna de Apoyo	22	7.77
Total	283	100

Anexo 6. Órdenes de suelo

Orden de suelo	Área en km^2	% de área
Mollisols	158	55.83
Entisols	93	32.86
Alfisols	9	3.18
Andisols	1	0.36
Laguna de Apoyo	22	7.77
Total	283	100

Anexo 7. Texturas del suelo

Textura	Área en km^2	% de área
Arcillo Arenoso	3.37	1.19
Franco Limoso	18.30	6.47
Franco Arcilloso	238.48	84.27
Franco Arenoso	0.85	0.30
Laguna de Apoyo	22	7.77
Total	283	100

Anexo 8. Vulnerabilidad del acuífero

Vulnerabilidad	Área en km^2	% de área
Media	200.75	70.94
Baja	60.25	21.29
Laguna de Apoyo	22	7.77
Total	283	100