



**Por un Desarrollo
Agrario Integral
y Sostenible**

Universidad Nacional Agraria
Facultad de Recursos Naturales y del
Ambiente

Trabajo de Graduación

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

Autor:

Br: José Ariel Cruz Martínez

Asesores:

Ing. Álvaro Martínez Gadea

Ing. Alex Castellón Meyrat

Managua, Nicaragua

Marzo, 2019



“Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible”

Universidad Nacional Agraria

Facultad de Recursos Naturales y del
Ambiente

Tesis para optar al título de Ingeniero en
Recursos Naturales Renovables

Trabajo de Graduación

Caracterización de la vulnerabilidad global a contaminación
del acuífero de la microcuenca del municipio de Nagarote.

Departamento de León. 2017-2019.

Autor:

Br. José Ariel Cruz Martínez

Asesores:

Ing. MP. Álvaro Martínez Gadea

Ing. Alex Castellón Meyrat

Managua, Nicaragua

Marzo, 2019

El presente trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable tribunal examinador designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

Miembros del tribunal examinador

Presidente

Secretario

Vocal

Managua, Nicaragua

Marzo, 2019

INDICÉ DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
INDICE DE CUADROS	iii
INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE ANEXO	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ACRONIMOS	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	13
II. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Descripción del área de estudio	15
3.1.1. Ubicación geográfica.....	16
3.1.2. Características biofísicas.....	16
• Clima.....	16
• Hidrología.....	16
• Geología.....	16
• Geomorfología.....	17
• Hidrogeología.....	17
• Flora.....	17
• Fauna.....	17
• Suelo.....	17
3.2. Proceso Metodológico	19
3.2.1. Planificación del trabajo.....	20
3.2.2. Recolección de datos de campo.....	20
3.2.3. Clasificación de variables.....	22
3.2.4. Procesamiento de datos en ambiente SIG	23
3.2.5. Interpretación y descripción de resultados	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1. Características hidrogeológicas del área de estudio	25

4.2.	Grado de confinamiento del acuífero y ocurrencia del sustrato suprayacente	26
4.3.	Distancia al nivel del agua subterránea	29
4.4.	Estimación de la vulnerabilidad del acuífero mediante el Método GOD	33
V.	CONCLUSIONES.....	37
VI.	RECOMENDACIONES	39
VII.	LITERATURA CITADA	40
VIII.	ANEXOS	42

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de graduación a Dios Padre por cuidar de mí espiritualmente en mi ciclo de estudio y por darme noción de sabiduría, entendimiento, y respeto con vosotros de igual manera lograr culminar mi Carrera: Ing. Recursos Naturales Renovables.

Para mi padre: José Esteban Cruz Ruiz

&

Mi madre: Lidia Martínez Gutiérrez

AGRADECIMIENTO

Si recorres el camino de tus sueños, Comprométete con él. No dejes la puerta de Salida abierta, con la disculpa de: «Esto no es lo Que quería.» Esta frase guarda en sí misma la Semilla de la derrota.

Asume tu camino. Aunque tengas que dar pasos Inciertos, aunque sepas que puedes hacer mejor lo que estás haciendo. Si aceptas tus Posibilidades en el presente, con toda certeza, Mejorarás en el futuro. Pero si niegas tus limitaciones, jamás te librarás de ellas. Afronta tu camino con coraje, no tengas miedo de las críticas de los demás. Y, sobre todo, no te dejes paralizar por tus propias críticas.

Dios estará contigo en las noches de insomnio, y Enjugará las lágrimas ocultas con Su amor. Dios es el Dios de los valientes.

Caminos (Paulo Coelho).

Agradezco a Dios, por brindarme sabiduría.

Agradezco a mis hermanos: Ninoska Judith Cruz Martínez y Jeovanis Eliazar Cruz Martínez por apoyarme moralmente en tiempos difíciles.

Quiero agradecer a mi primo: Luis Enrique Cruz Torres por ayudarme, a ganar conocimientos profesionales y destacarme en el área laboral.

En el ámbito profesional quiero agradecer a los asesores del tema de graduación: Ing. Alex Castellón Meyrat y Mp, Ing. Álvaro Martínez Gadea, por el tiempo y la dedicación brindada la cual fue de gran ayuda para ganar conocimientos que enriquecen mi desarrollo profesional.

Agradezco a la PnD. Heyddy Calderón la cual nos brindó a poyo para la caracterización geologicas de los acuíferos del área de estudio, que apporto información requerida para la culminación del tema de tesis.

INDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Tabla de las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas presentes en el acuífero.</i>	26
<i>Cuadro 2. Calculo de la vulnerabilidad del acuífero a partir de método GOD..... ¡Error! Marcador no definido.</i>	

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación geográfica del acuífero Nagarote, (2018). Elaboración Propia.</i>	15
<i>Figura 2. Mapa de uso actual de suelo en la microcuenca de Nagarote Fuente: Elaboración propia.</i>	18
<i>Figura 3. Flujo de trabajo para la caracterización de la vulnerabilidad global del acuífero de Nagarote.</i>	19
<i>Figura 4. Medición de profundidad del techo de agua.</i>	21
<i>Figura 5. Perfil geológico de la formación Las Sierras a la izquierda y piroclastos a la derecha.</i>	21
<i>Figura 6. Esquema para clasificación de variables o parámetros del método GOD (Banco Mundial, 2007).</i>	22
<i>Figura 7. Esquema conceptual de la estimación de vulnerabilidad del método GOD (Banco Mundial, 2007).</i>	23
<i>Figura 8. Mapa geológico del área del acuífero de Nagarote (Catastro e IRENA, 1972).....</i>	25
<i>Figura 9: Perfil estratigráfico del área de estudio. Fuente. Mapa Geológico 2852-I.....</i>	27
<i>Figura 10. Coeficientes de correlación profundidades de pozos con respecto al relieve.....</i>	30
<i>Figura 11. Mapa de niveles de profundidades del agua subterránea en los pozos.</i>	31
<i>Figura 12. Mapa de curvas piezométrica del acuífero de Nagarote.</i>	32
<i>Figura 13. Mapa de Áreas de cultivos anuales.....</i>	35
<i>Figura 14. Mapa de Vulnerabilidad hidrogeológica para el acuífero de Nagarote. Fuente: Elaboración Propia.</i>	36

INDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1. Total, de área de las formaciones geológicas.....</i>	<i>42</i>
<i>Anexo 2. Características Hidrogeológicas (Norbert Fenzl 1989).....</i>	<i>42</i>
<i>Anexo 3. Definición de la clase de Vulnerabilidad hidrogeológica.</i>	<i>42</i>
<i>Anexo 4. Porcentaje de vulnerabilidad hidrogeológica del área del estudio.</i>	<i>43</i>
<i>Anexo 5. Granulometría de la Litología encontrada en el sitio.</i>	<i>43</i>
<i>Anexo 6. Porcentaje de área de vulnerabilidad den acuífero.</i>	<i>44</i>
<i>Anexo 7. Formato de recolección de datos de campo.....</i>	<i>44</i>
<i>Anexo 8. Formato de recolección de datos de pozos.</i>	<i>45</i>

RESUMEN

En nuestro país, 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 realizar este estudio que es pertinente al contexto actual y se realizó, para el acuífero de la microcuenca del municipio de Nagarote delimitado previamente utilizando el programa Arc gis 10.4.1, complementando con revisión de información secundaria y el levantamiento de la información primaria de algunas variables de campo encontrando cuatro formaciones geológicas. Las Sierras, Cuaternario Piroclásticos, Cuaternario Indiferenciado y Tamarindo Medio; la granulometría de su litología ha originado un acuífero, poroso, permeable, con alta capacidad de trasmisividad, clasificado según su grado de confinamiento, como No Confinado y No Confinado Cubierto, ambos ocupan el 99.31 % del área de la microcuenca. El mapa de piezometria elaborado nos da tres pisos altitudinales con una separación entre si de 10 m, a su vez nos muestra dos escenarios de flujos con sentido Noreste descargando hacia el lago de Managua y sentido Suroeste descargando hacia la cuenca del rio Tamarindo. Según los resultados de la aplicación del método GOD, el acuífero No Confinado tiene vulnerabilidad extrema y abarca un área de 60.78%, respecto al total, seguido del No Confinado Cubierto, con vulnerabilidad moderada y abarca un área 38.53 % del área y la formación Tamarindo medio que no constituye acuíferos por su litología y posición respecto a las otras formaciones. Dado que la capacidad de atenuación natural del perfil de suelo a los contaminantes varía ampliamente según las condiciones geológicas cercanas a la superficie del terreno, es más efectivo el tipo y nivel de control si conocemos su capacidad de atenuación y dirección de flujo, siendo este el fin del mapeo de la vulnerabilidad a su vez, es el primer paso, para la evaluación del riesgo a contaminación del acuífero.

Palabras claves: Mapeo, Geología, Acuífero, Piezometria, Vulnerabilidad, Riesgo, GOD

ABSTRACT

In our country, the industrial sector, the home and the agricultural, the main users of water resources, both surface and underground, their total dependence on this resource. This is the reason why, in the current context, for the aquifer, the municipality of Nagarote, eliminated, eliminated, the system ar gis 10.4.1, the complement of the review of the secondary information and the survey of information Primary of some field variables finding four geological formations. The Sierras, Piroclastic Quaternary, Undifferentiated Quaternary and Middle Tamarind; The granulometry of its lithology originated in an aquifer, porous, permeable, with high capacity of transmissivity, classified according to its degree of confinement, as Not Confined and Not Confined Covered, both occupy 99.31% of the area of the microbasin. The piezometry map is composed of three altitude levels with a distance of 10 m from each other, once it is shown to us. According to the results of the application of the GOD method, the No Confined aquifer has a ratio of use and an area of 60.78%, with respect to the total, followed by Non-Confined Covered, with moderation and 38.53% of the area and the middle Tamarindo formation. That there are no aquifers for their lithology and position with respect to the other formations. Since the natural attenuation capacity of the soil profile to the pollutants is communicated according to the geological conditions to the surface of the land, the type and level of control is more effective if the attenuation capacity and the direction of flow are known, This the end of the vulnerability map, in turn, is the first step, for the evaluation of the aquifer contamination risk.

Keywords: Mapping, Geology, Aquifer, Piezometry, Vulnerability, Risk, GOD.

ACRONIMOS

BM	Banco Mundial
IRENA	Instituto Nicaragüense de los Recursos Naturales
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
IGG	Instituto de Geología y Geofísica
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
NEA	Nivel Estático del Agua
TQps	Terciario Cuaternario Grupo Las Sierras
Q	Cuaternario Indiferenciado
Qv	Cuaternario Volcanico Piroclástico
Tmtm	Terciario Tamarindo Medio
SIG	Sistema de Información Geográfica.
GOD	Groundwater occurrence (Grado de confinamiento del acuífero), Overall aquifer class (Ocurrencia del sustrato suprayacente), Depth (Distancia al nivel del agua subterránea).
PHCA	Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano

I. INTRODUCCIÓN

Considerando la contaminación masiva a que están siendo sometidas las aguas superficiales en muchos países de la región, las aguas subterráneas se convierten en una fuente importante de agua con calidad aceptable para satisfacer las demandas del ser humano.

Nicaragua es un país especialmente privilegiado en cuanto a recursos hídricos, cuenta con 38,668 m³/cápita, lo que posiciona al país por encima del promedio para los países de Centroamérica. A pesar de ello, la contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos ha tenido un gran impacto negativo en la disponibilidad (FAO, 2003).

La contaminación de los recursos hídricos en Nicaragua es un problema ascendente que a diario muestra más evidencia. Sin embargo, se tiene muy poca información del grado de contaminación de estas reservas de agua subterráneas en el país.

A esta creciente problemática se suma la escasez económica de agua (International Water Management Institute, 2007), debido, a la falta de recursos financieros para utilizar y mantener las fuentes de agua con calidad adecuada para consumo humano y por otro lado, a los problemas de gobernanza para la buena gestión integral del recurso.

Ante estas situaciones en algunos sitios de nuestro país se han desarrollado evaluaciones de vulnerabilidad del agua subterránea utilizando diversos métodos como herramientas a fin de obtener información necesaria, para planear y manejar las aguas subterráneas y así prevenir y reducir el riesgo a la contaminación de este preciado recurso.

A partir de este escenario nacional surge la necesidad de continuar realizando estudios de los acuíferos; en este momento desarrollaremos el estudio de la vulnerabilidad, para uno de los acuíferos más importante del país, específicamente a las aguas subterráneas de la microcuenca Nagarote del departamento de León.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.

- Caracterizar la vulnerabilidad global a contaminación del acuífero de la microcuenca del municipio de Nagarote. Departamento de León.

2.2 Objetivos específicos.

- Clasificar los acuíferos de acuerdo a su nivel de confinamiento hidráulico a partir de una interpretación del perfil estratigráfico de cada formación geológica encontrada en el área de estudio.
- Describir las condiciones geológicas de los estratos confinantes y su influencia en la vulnerabilidad a contaminación del acuífero.
- Estimar la distancia al techo del acuífero en toda la microcuenca y la dirección de flujo del agua subterránea.
- Conocer la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero aplicando el método GOD, para las formaciones geológicas

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área de estudio

La selección del área de estudio toma en cuenta parámetros básicos tales como: es una parte del gran y más importante acuífero del país; es una porción del área más poblada del país lo que a su vez implica alta demanda y la cantidad de agua precipitada por año es poca en relación a otras zonas del país. La delimitación del área de estudio se realizó tomando en cuenta la hidrología superficial según clasificación del Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (PHCA) y la dirección de flujo subterráneo expresado en el mapa de hidrogeología del pacífico.

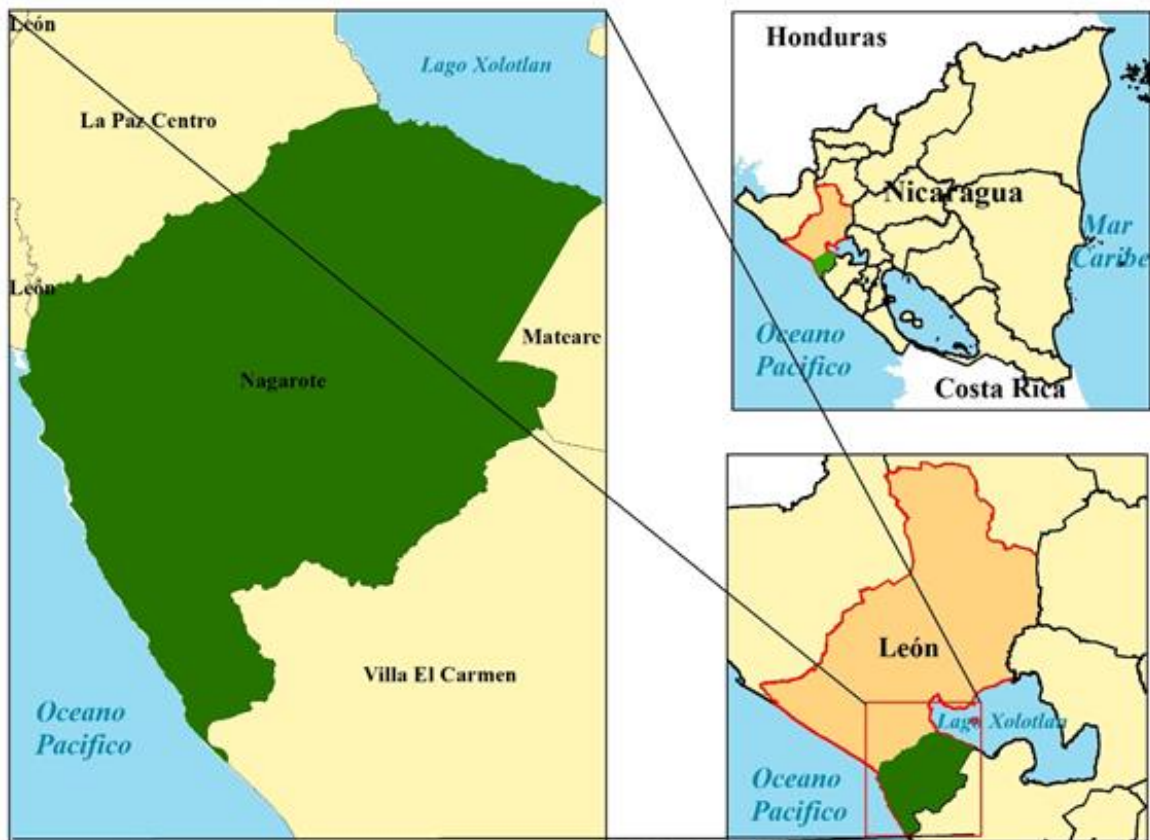


Figura 1. Ubicación geográfica del acuífero Nagarote, (2018). Elaboración Propia.

3.1.1. Ubicación geográfica

El estudio se realizó en la microcuenca del municipio de Nagarote del departamento de León, localizado en el Occidente de Nicaragua, está ubicado entre las coordenadas 12° 16' 3" Norte, 86° 33' 55" Este. El municipio cuenta con una superficie de 598.39 km² y posee una altura promedio de 75.69 metros sobre el nivel del mar. Se caracteriza por tener un clima seco, con lluvias aleatorias de verano. La temperatura general del municipio es caliente y oscila en un promedio anual de 38.2 C°. Ver figura 1.

3.1.2. Características biofísicas

- **Clima**

Se caracteriza por tener un clima seco, con lluvias aleatorias de verano que favorecen una vegetación nativa del tipo Sabana Tropical, se ubica en la zona climática clasificada como Tropical de Sabana con una precipitación promedio anual de 800 – 1300 mm. Según (UNAN-León 2013).

- **Hidrología**

Se caracteriza por tener patrón de drenaje dendrítico, Algunos de estos ríos han sido represados para pequeños aprovechamientos. Sin embargo, la combinación de altas tasas de infiltración, con el corto recorrido de los ríos y la fuerte evaporación registrada en el área, limitan la formación y la correspondiente disponibilidad de escurrimiento superficial al punto que la mayoría transportan caudales importantes de agua únicamente durante el período lluvioso. (UNAN-león 2013).

- **Geología**

La distribución de las formaciones geológicas en la cuenca, están compuestos por depósitos aluviales, piroclásticos recientes y piroclásticos terciarios de la formación las Sierras. Los primeros son característicos de la parte superior del sistema acuífero, por lo general aflorante y con mayor espesor en las riberas de los ríos (el espesor oscila de 0 a 30 metros), se representan por gravas, arenas finas a gruesas, limos y arcillas. Le subyace el basamento del acuífero, asociado a las ignimbritas de la Formación Tamarindo. (Castillo, 1972).

- **Geomorfología**

Es una extensa llanura de origen volcánico, con una pendiente de 2%. Está comprendida entre las cotas cero y 100 metros sobre el nivel del mar, y hacia el sur oeste bordea casi en su totalidad las zonas más altas que corresponden a las Mesetas del Tamarindo. (Castillo, 1972).

- **Hidrogeología**

El acuífero abarca principalmente la cuenca de Nagarote-La Paz Centro, que constituye la fuente de agua subterránea más importante. Este se ubica desde norte hacia el sur, en la parte oeste. Además, se encuentran acuíferos fracturados, discontinuos de menor transividad en la zona costera. (Castillo, 1972).

- **Flora**

El Municipio de Nagarote se ubica en La Región Ecológica I, Sector del Pacífico, en la Formación Vegetal Zonal del Trópico de acuerdo a la clasificación de Salas. La Región Ecológica I (del Pacífico) es, en términos generales es la más seca y caliente del país. Desde el punto de vista de la fisionomía de la vegetación y de su composición florística, la Región Ecológica I comprende diferentes categorías de vegetación una gran diversidad de especies vegetales nativas y de asociaciones vegetales cuya presencia en cada localidad responde a los factores ecológicos de clima, geología, topografía, suelo y actividades humanas. (Salas E., 1993).

- **Fauna**

Al igual que la Flora, la situación de la Fauna en el municipio de Nagarote ha sido presionada y desplazada como producto del avance de la frontera agrícola, la expansión de las áreas urbanas y de cultivos, la pérdida de los bosques y consecuente pérdida de hábitat de las especies, así como la actividad de cacería, quemas agrícolas y extracción, para consumo y comercio de las diferentes especies. La fauna silvestre de mayor representación en el municipio está ubicada principalmente en los hábitats que aún conservan los ecosistemas de áreas protegidas de los municipios más próximos.

- **Suelo**

Sus suelos son calcáreos, poco propicios para la explotación agrícola intensiva y favorecedores de una ganadería extensiva. (Castillo, 1972). La mayor parte de los suelos son ocupados por cultivos anules 30.82% (caña de azúcar y maní), seguido de la vegetación arbustiva con 28.70%

y pastizales destinados a la ganadería extensiva y los reductos de bosques latifoliado ocupan un área mínima en cuanto al uso actual global del sitio. Ver figura 2.

Los diferentes usos del suelo, pueden en gran medida condicionar el nivel de vulnerabilidad intrínseca y extrínseca, para un determinado acuífero y cuando su uso está dirigido mayormente a la producción agropecuaria, podríamos aseverar que estamos ante una inminente amenaza de contaminación, aun sin lograr determinar el nivel de riesgo que esto implique.

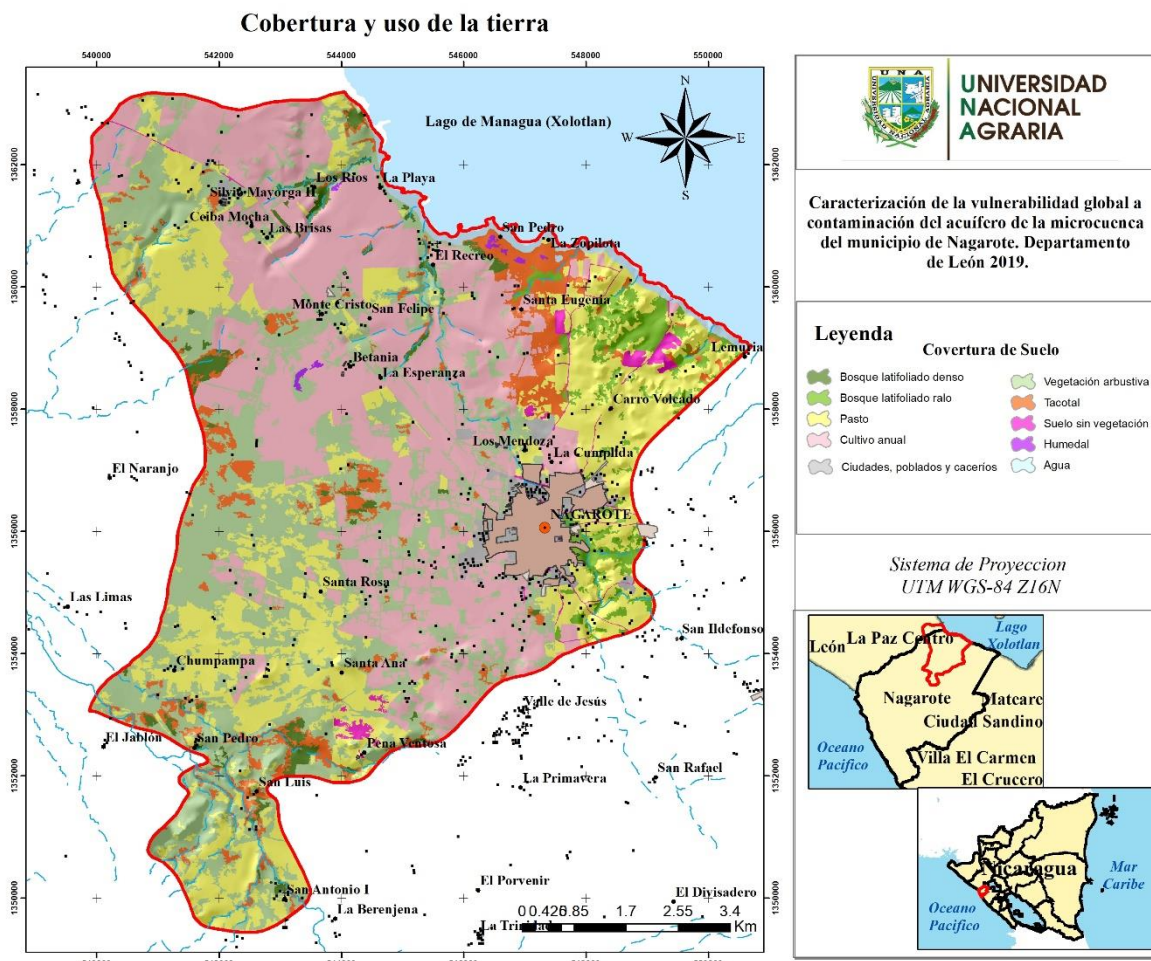
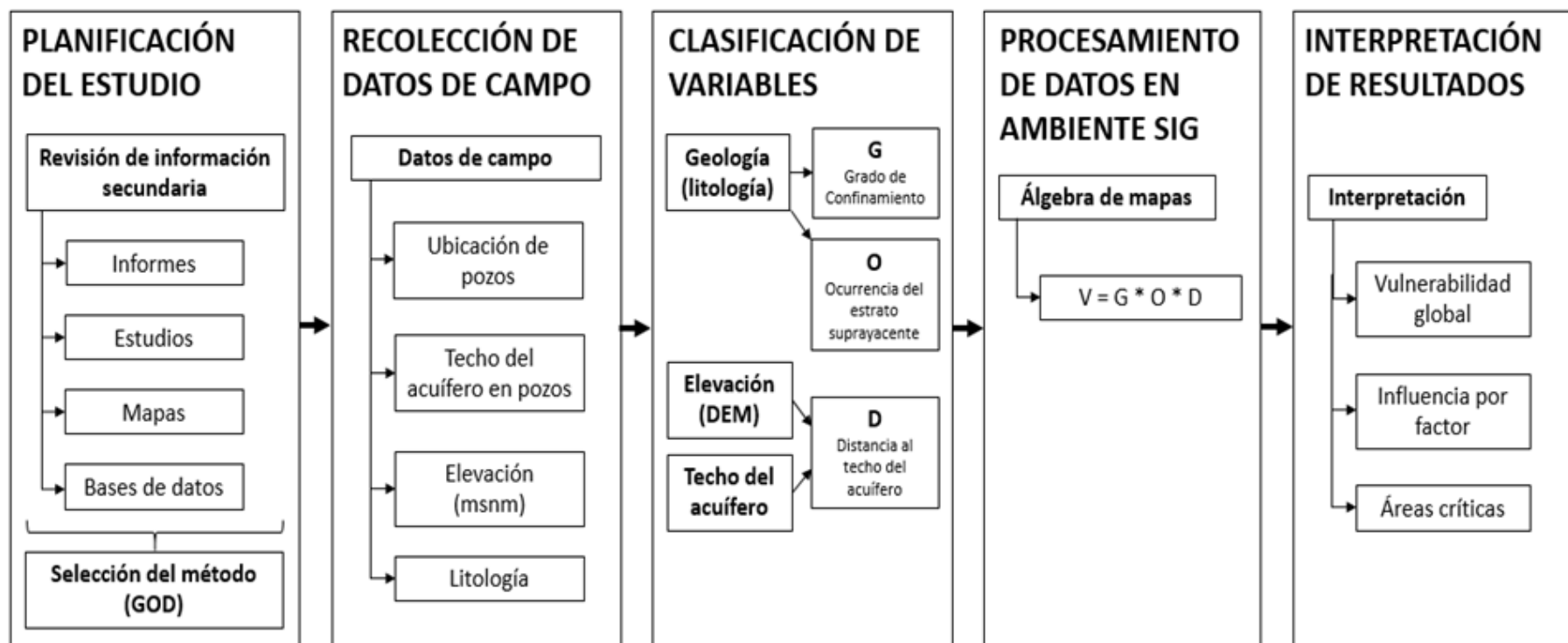


Figura 2. Mapa de uso actual de suelo en la microcuenca de Nagarote Fuente: Elaboración propia.

3.2. Proceso Metodológico

El presente estudio se completó en cinco etapas de trabajo: a) Planificación, b) Recolección de datos en campo, c) Clasificación de variables, d) Procesamiento de datos y e) Interpretación de resultados. Estas etapas se detallan a continuación.

Figura 3. Flujo de trabajo para la caracterización de la vulnerabilidad global del acuífero de Nagarote.



3.2.1. Planificación del trabajo

Incluye la revisión de información secundaria y la selección del método a utilizar. La información revisada se compone por informes hidrogeológicos, mapas históricos, estudios sobre vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos bajo diferentes metodologías y bases de datos geográficas en formatos vectoriales y raster.

De manera general, estos datos sólo facilitan la caracterización hidrogeológica de la zona de estudio. Sin embargo, para una gestión adecuada del recurso hídrico subterráneo se requiere de una evaluación del peligro y grado de vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos.

Para el presente estudio, se seleccionó la metodología GOD (Banco Mundial, 2007), por ser un modelo simple, capaz de generar una valoración global para el acuífero a partir de condiciones intrínsecas. Además, se adapta a la calidad de los datos disponibles y es fácil implementarlo bajo un ambiente SIG. Esto último, facilita analizar espacialmente la relación entre vulnerabilidad con posibles focos de contaminación y modelar el procedimiento para replicarlo en otras áreas de interés.

3.2.2. Recolección de datos de campo

El modelo GOD, se sustenta en el análisis integrado de tres variables principales: grado de confinamiento del acuífero ($G = \text{Groundwater occurrence}$), ocurrencia del sustrato suprayacente ($O = \text{Overall aquifer class}$) y distancia al nivel del agua subterránea ($D = \text{Depth}$). Estos factores tratan de simular las condiciones propias del terreno que facilitan o atenúan el movimiento del agua y los posibles contaminantes desde la superficie hasta el manto acuífero (Banco Mundial, 2007).

Adicionalmente, se consideraron como variables auxiliares la elevación, las formaciones geológicas, piezometría y los usos agrícolas de la tierra para adaptar la información requerida en el modelo a un ambiente SIG.

La distancia al nivel del agua subterránea se estimó a partir de mediciones georreferenciadas en 39 pozos, durante el mes de abril 2018. Estos datos puntuales permitieron identificar una relación estrecha entre la profundidad del manto acuífero y las elevaciones del terreno. Utilizando la ecuación de correlación y la calculadora raster de ArcGIS, se elaboró un mapa de profundidades de pozos para toda el área de estudio.

Figura 4. *Medición de profundidad del techo de agua.*



El grado de confinamiento del acuífero y la permeabilidad del estrato suprayacente se derivaron de las condiciones de porosidad de las litologías presentes en el área de estudio. Las secuencias litológicas se estudiaron a partir de mapas geológicos 1:50,000 (Catastro e IRENA, 1972), cortes en caminos y laderas expuestas.

La distribución espacial de suelos se llevó a cabo mayormente en gabinete, utilizando como base mapas de series de suelos escala 1:20,000 (Catastro e IRENA, 1972), con actualizaciones realizadas por INETER (2018). En menor medida, se identificaron órdenes de suelo en las inmediaciones de los pozos georreferenciados.

Figura 5. *Perfil geológico de la formación Las Sierras a la izquierda y piroclástos a la derecha.*



3.2.3. Clasificación de variables

Los datos recopilados se clasificaron siguiendo la metodología GOD. Cada factor se clasificó en valores entre 0 a 1, atendiendo su variabilidad espacial y su posible influencia sobre la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. La figura 5. Ilustra con mayor detalle los aspectos mencionados.

Durante esta etapa, se solicitó apoyo a la PhD. Heyddy Calderón, Directora Ejecutiva del IGG-CIGEO, para identificar las relaciones existentes entre diferentes litologías con la permeabilidad y el grado de confinamiento del acuífero.

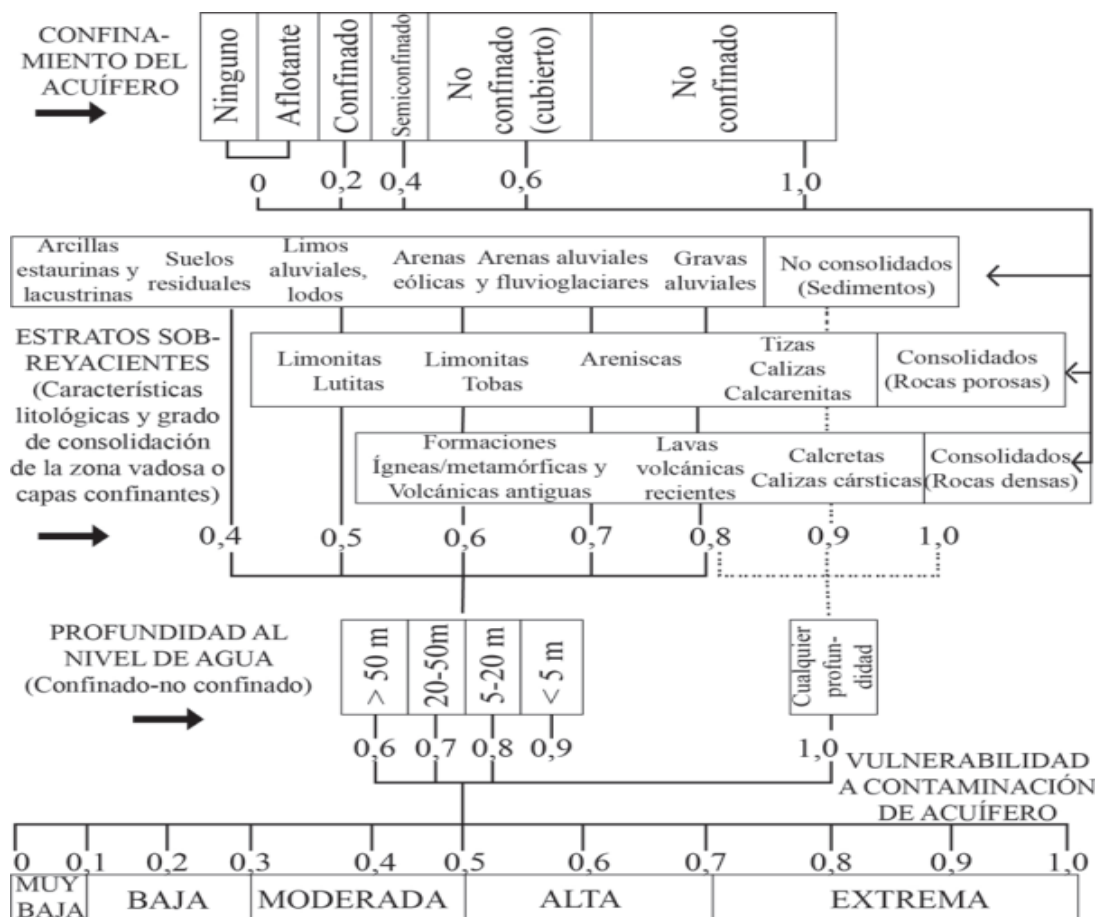


Figura 6. Esquema para clasificación de variables o parámetros del método GOD (Banco Mundial, 2007).

3.2.4. Procesamiento de datos en ambiente SIG

El procesamiento se llevó a cabo con ayuda del software ArcGIS 10.4.1. De forma resumida, todos los datos se clasificaron en función de los valores previamente asignados y fueron transformados a formato raster para su posterior combinación mediante álgebra de mapas.

En capas vectoriales, como geología, los valores de peso fueron incluidos en columnas de la tabla de atributos. Posteriormente se transformaron a formato raster utilizando el geoproceso “Feature to Raster”. Mientras que los datos raster, se reclasificaron en valores entre 0 y 1 utilizando la función “Reclassify”.

El mapa de vulnerabilidad se obtuvo a través de la multiplicación de todos los factores con ayuda de la calculadora raster o “raster calculator”. El resultado se reclasificó en cinco rangos para categorizar la vulnerabilidad despreciable, baja, media, alta y muy alta. Es importante destacar que la resolución espacial utilizada para todos los datos de entrada y salida equivale a 20 metros.

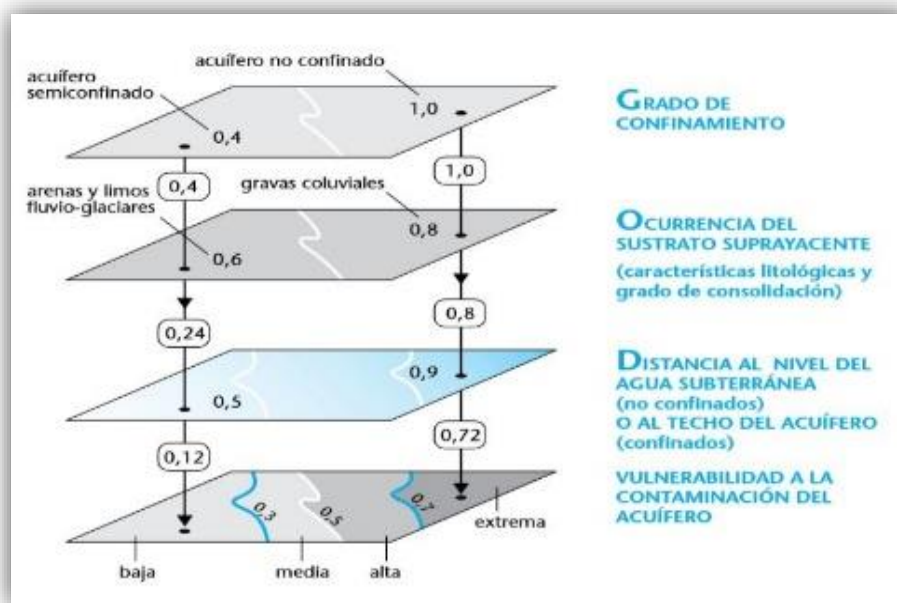


Figura 7. Esquema conceptual de la estimación de vulnerabilidad del método GOD (Banco Mundial, 2007).

3.2.5. Interpretación y descripción de resultados

La última etapa se dedicó a la interpretación y descripción de los resultados. Esta etapa incluyó: una evaluación de la vulnerabilidad global del acuífero de la microcuenca y la influencia de

cada factor en el proceso. Se incorporó el mapa de usos de suelo con el fin de identificar posibles focos de contaminación y una interpretación de mapas piezométricos para conocer la dirección del flujo de cargas contaminantes eventuales.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características hidrogeológicas del área de estudio





El área de estudio se encuentra constituida por depósitos de origen volcánico. Las litologías se componen principalmente de conglomerados de rocas y/o sedimentos no consolidados. En la microcuenca predominan las formaciones Las Sierras (42.13 km²), Cuaternario Indiferenciado (32.82 km²) y Cuaternario Piroclástico (5.33 km²), las cuales abarcan el 52.12%, 40.60% y 6.59% del área de estudio respectivamente.

Estas litologías contrastan con una pequeña porción de rocas consolidadas correspondientes a la formación Tamarindo (Tmtm) ubicada en el sector Suroeste, la cual abarca apenas 0.55 km², equivalente al 0.69% del área total.



Figura 8. Mapa geológico del área del acuífero de Nagarote (Catastro e IRENA, 1972)

De manera general, las características geológicas propician acuíferos no confinados, de permeabilidad buena y capacidad de transmisibilidad alta. Esto se debe a que los depósitos volcánicos no consolidados forman un medio físico poroso y permeable, que facilita el almacenamiento y la circulación del agua. En la siguiente tabla se resumen las características hidrogeológicas relevantes para el presente estudio.

Era	Periodo	Formaciones	Características Hidrogeológicas ¹			
			Medio Físico	Transmisibilidad	Permeabilidad	Rocas
Cenozoica	Terciario-Cuaternario	Grupo las Sierras (TQps).	Poroso	Alta- Media	Buena	
	Cuaternario	Depósitos Piroclásticos (Qv)	Poroso	Alta	Excelente	
	Terciario	Formación Tamarindo (Medio Tmtm)	Fisurado	Baja-nula	Variable	
	Cuaternario volcánico	Lava y piroclastos indiferenciado (Qvl)	Poroso	Alta	Variable	

Cuadro 1. Tabla de las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas presentes en el acuífero.

4.2. Grado de confinamiento del acuífero y ocurrencia del sustrato suprayacente

Para estimar la vulnerabilidad, se requirió conocer el grado de confinamiento hidráulico y el nivel de consolidación del sustrato suprayacente o capas confinantes de los acuíferos presentes en la microcuenca. Estos dos parámetros dependen de las características intrínsecas de cada formación geológica presente en la microcuenca.

¹ Clasificación según Fenzl, N. 1989.

En el perfil estratigráfico se puede apreciar que la capa tamarindo medio sirve de basamento para las formaciones, Las Sierras, Cuaternario Volcánico y cuaternario piroclástico. Originadas a partir de depósitos aluviales y coluviales constituidos por pómez, lapilli, tobas líticas y tobas angolmeraticas, procedentes de depósitos volcánicos.

El perfil estratigráfico nos muestra la distribución espacial de las columnas litológicas que constituyen las formaciones y dan origen al acuífero, presentando una sucesión vertical poroso altamente permeable y con niveles de trasmisividad alta y según (Fenzl, N. 1989). Estas características geológicas forman acuíferos muy productivos en términos de captación y almacenamiento de agua subterránea.

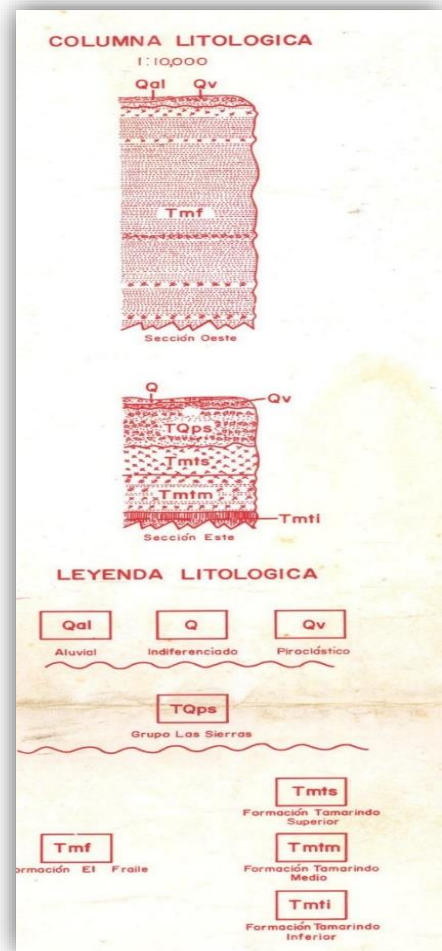


Figura 9: Perfil Estratigráfico del área de estudio. Fuente. Mapa Geológico 2852-1

4.2.1. Grupo Las Sierras (TQPS)

Abarca el sector Este y parte del centro del área de estudio. Sobre esta formación se asienta el casco urbano de Nagarote, así como las comarcas Las Ojedas y Peña Ventosa y los poblados San Pedro, Buenos Aires, El Disparate, Los Mendoza, La Zopilota, El Mangol, San José, El Tabacal, Santa Rosa, El Porvenir, El Bachinche, La Pizota y San Luis.

Esta formación se considera uno de los mejores y más extensos acuíferos del país. Está constituido por material piroclástico grueso, parcialmente meteorizado y compactado, entre los cuales destacan: pómez, lapilli, tobas líticas y tobas anglomeráticas. Estos materiales originan un medio poroso, con buena permeabilidad y transmisibilidad media a alta (Kuang, 1971).

Debido a su composición litológica y disposición estratigráfica, se comporta como un acuífero no confinado, con sustrato suprayacente parcialmente consolidado. En algunos sectores, como las proximidades de la Finca Santa Eugenia, ubicada a 0.95 km de Longitud del Lago de Managua, se transforma en un acuífero libre porque aflora en forma de manantial. En base a estos criterios, el Grupo Las Sierras se considera de vulnerabilidad extrema para los parámetros grado de confinamiento hidráulico y ocurrencia del sustrato suprayacente.

4.2.2. Cuaternario Volcánico Indiferenciado (Q)

Se extiende desde la parte central hacia el Oeste del área de estudio, abarcando las comarcas San Antonio, La Chilama, así como los poblados San Antonio, La Pavona, Las Delicias, El Tamarindo, El Edén, La Esperanza, El Tempisque, Los Laureles, La Playa y El Recreo.

Está conformado por una mezcla de depósitos procedentes de distintas erupciones volcánicas, que han sufrido alteraciones físicas con el paso del tiempo. Entre éstos se han identificado: pómez, escoria basáltica, basalto, basalto olivínico, andesitas y fenoandesitas. La disposición de los materiales y la presencia de rocas origina un medio poroso, de alta transmisividad y permeabilidad variable. Ver anexo 2.

Debido a la naturaleza mixta de sus depósitos, entre los cuales se encuentran fragmentos de lavas basálticas y andesíticas, se comporta como un acuífero no confinado cubierto. La fracturación en las rocas posibilita la transmisividad del agua, mientras que la presencia de arcillas reduce la capacidad de infiltración.

En base a estos criterios, la formación Cuaternario Volcánico Indiferenciado se considera de vulnerabilidad moderada para el parámetro grado de confinamiento hidráulico y vulnerabilidad media a alta para la ocurrencia del sustrato suprayacente.

4.2.3. Cuaternario Piroclástico (Qv)

Se encuentra en la parte Noroeste del área de estudio, comprende los poblados Villa San Narciso, El Topón, El Carmen, Silvio Mayorga y El Recuerdo. Está compuesto por depósitos volcánicos de origen reciente, con espesores hasta de 90 metros, formados por cenizas finas, pómez, lapilli y arenas que van desde finas a gruesas. Dentro de estas capas aparecen pequeños lentes de aluviones arcillosos, producto de la erosión de los sedimentos del cuaternario. Estos

materiales cuaternarios conforman un medio físico poroso, de permeabilidad excelente y una transmisibilidad alta.

De acuerdo a su composición litológica, la formación se considera como un acuífero no confinado y su geología superficial o capa suprayacente no consolidada facilita la infiltración del agua a través del perfil. En base a estos criterios, la formación Cuaternario Piroclástico se considera de vulnerabilidad extrema para los parámetros grado de confinamiento hidráulico y ocurrencia del sustrato suprayacente.

4.2.4. Formación Tamarindo Medio (Tmtm)

Se localiza al Suroeste del área de estudio, cercano a los poblados El Tablón y San Carlos. Esta formación no constituye un acuífero propiamente dicho. Las areniscas e ignimbritas locales con espesores que varían entre 1.1 a 2.6 metros, forman un basamento sobre el cual yacen las otras formaciones geológicas.

También pueden formar un medio fisurado que posibilite la infiltración de agua, pero con condiciones de transmisibilidad baja y permeabilidad variable. Sus condiciones no le permiten acumular y reservar grandes cantidades de agua subterránea. En base a estos criterios, la formación Tamarindo Medio se considera de vulnerabilidad despreciable según el grado de confinamiento hidráulico y media según la ocurrencia del sustrato suprayacente.

4.3. Distancia al nivel del agua subterránea

4.3.1. Profundidad del techo del acuífero y su relación con el relieve

El tercer parámetro para estimar la vulnerabilidad es la distancia al techo del acuífero. Esta equivale a la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea con respecto a la superficie del terreno. Se entiende que los acuíferos someros son más vulnerables a la contaminación, debido a que la carga de contaminantes requiere recorrer menos distancia para alcanzar el flujo de agua subterráneo.

Para analizar la vulnerabilidad en función del techo del acuífero, se derivó un mapa de profundidades del agua subterránea a partir de la correlación entre las mediciones de pozos y la topografía del terreno. La figura 10 muestra los resultados de dicha correlación con un coeficiente R^2 de 74 %.

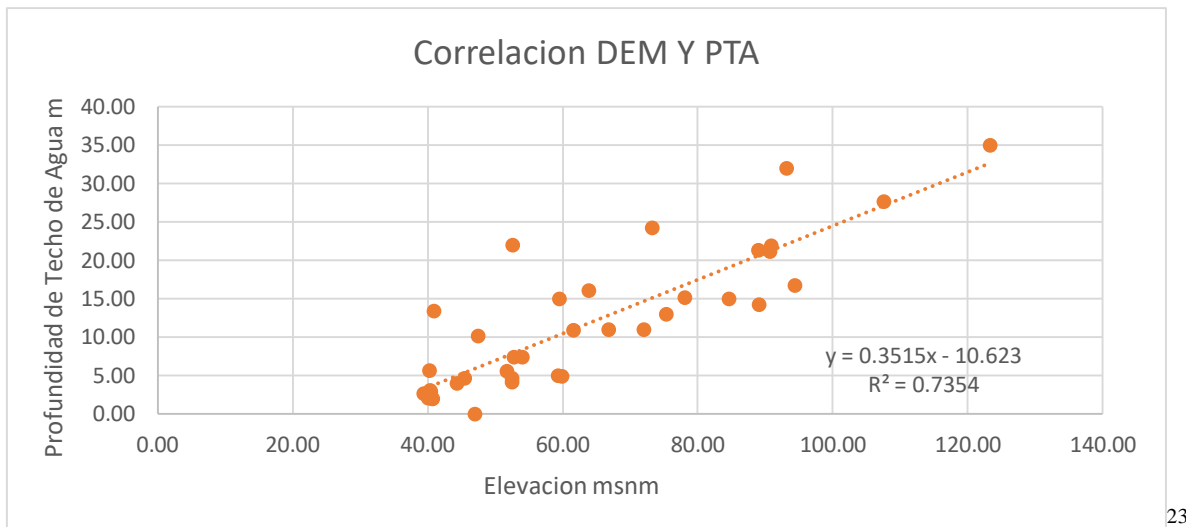


Figura 10. Coeficientes de correlación profundidades de posos con respecto al relieve.

El mapa generado se agrupó en cinco niveles de vulnerabilidad. La vulnerabilidad extrema se encuentra asociada a las características geológicas de las formaciones Grupo Las Sierras y Cuaternario Piroclásticos, debido a que la metodología GOD (Banco Mundial, 2007) asume valores extremos en acuíferos que subyacen a estratos de depósitos volcánicas recientes, independientemente de su profundidad.

Dentro de esta zona se encuentran el casco urbano de Nagarote, las comarcas y los poblados

Los poblados El Carmen, Vigía San Narciso, , El Recreo, La Zopilota, El Consuelo, El Disparate, Los Pochotes, Los Mendoza El Porvenir, Santa Roza, Peña Ventosa Y El Bochinche se localizan en el rango de vulnerabilidad alta, donde el acuífero se encuentra a profundidades menores de 5 m.

La vulnerabilidad moderada comprende las comarcas San Antonio, La Chilama y los poblados El Garabato, Las Pencas, Chumpampa, El tamarindo, Santa Ana, La Esperanza, Buenos Aires, El Obraje, Los Cocos, Ceiba Mocha y el papayal. Está definida por acuíferos con profundidades entre 5 y 20 m.

² PTA. Profundidad al Techo del Agua.

³ DEM. Modelo Digital de Elevación

El poblado San Pedro presentan vulnerabilidades de baja a despreciable, debido a que el agua se encuentra a en los rangos de profundidades 20 m a 50 m y mayor de 50 m respectivamente.

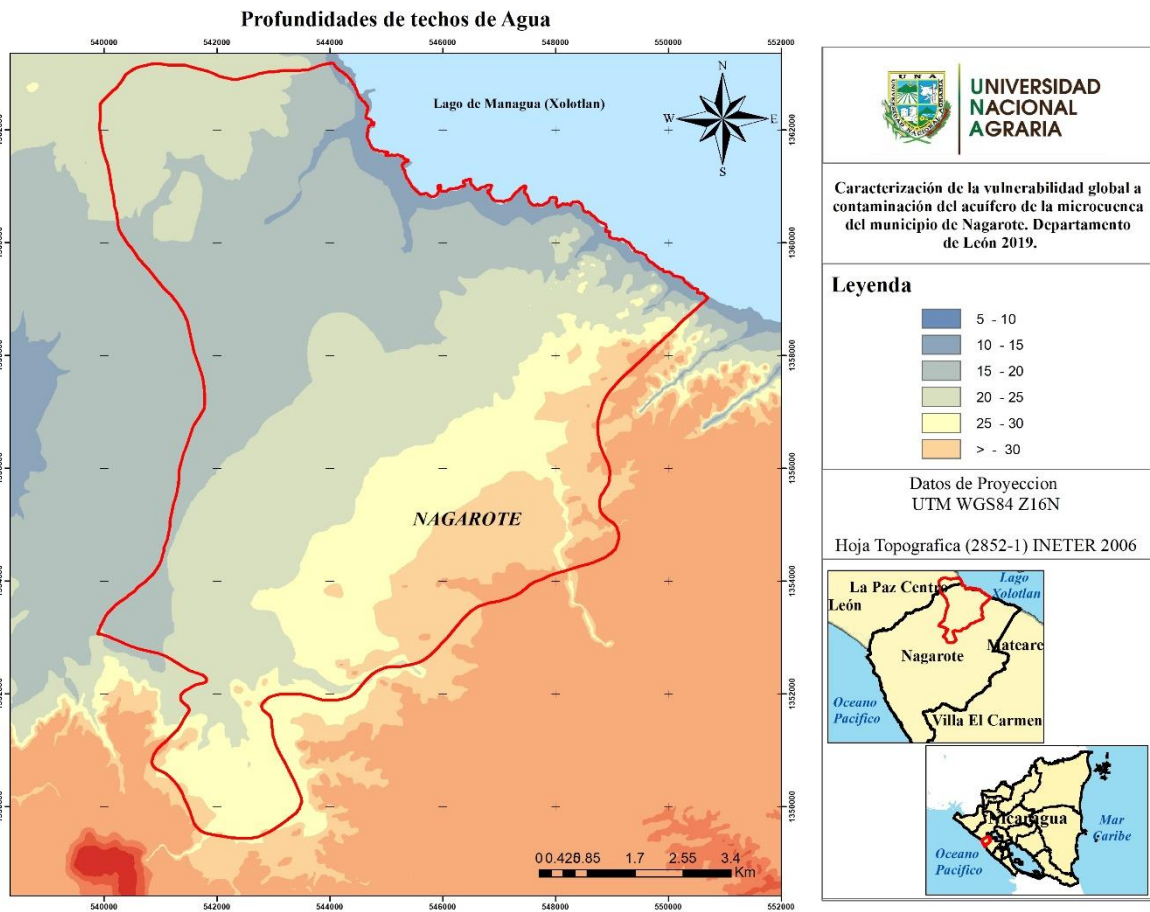


Figura 11. Mapa de niveles de profundidades del agua subterránea en los pozos.

4.3.2. Dirección de flujo del acuífero

La metodología GOD no contempla determinar la dirección de flujo del agua subterránea. Sin embargo, ésta es importante para identificar el movimiento de la carga contaminante y sus posibles áreas de impacto.

A partir de una interpretación visual de mapas piezométricos elaborados por Jiri Krasni (1989), se observó diferentes profundidades del nivel estático del agua que van desde los 40 hasta los 60 msnm. El patrón de las curvas indica dos posibles direcciones de flujo: a) uno con sentido Noreste en dirección al Lago de Managua y b) otro con sentido Suroeste en dirección a la cuenca del Río Tamarindo.

Separando las vertientes, se estima que el agua infiltrada en el 64% del área de la microcuenca, fluye de forma subterránea hacia el Lago de Managua. Mientras que el 36% restante lo hace hacia la cuenca del Río Tamarindo.

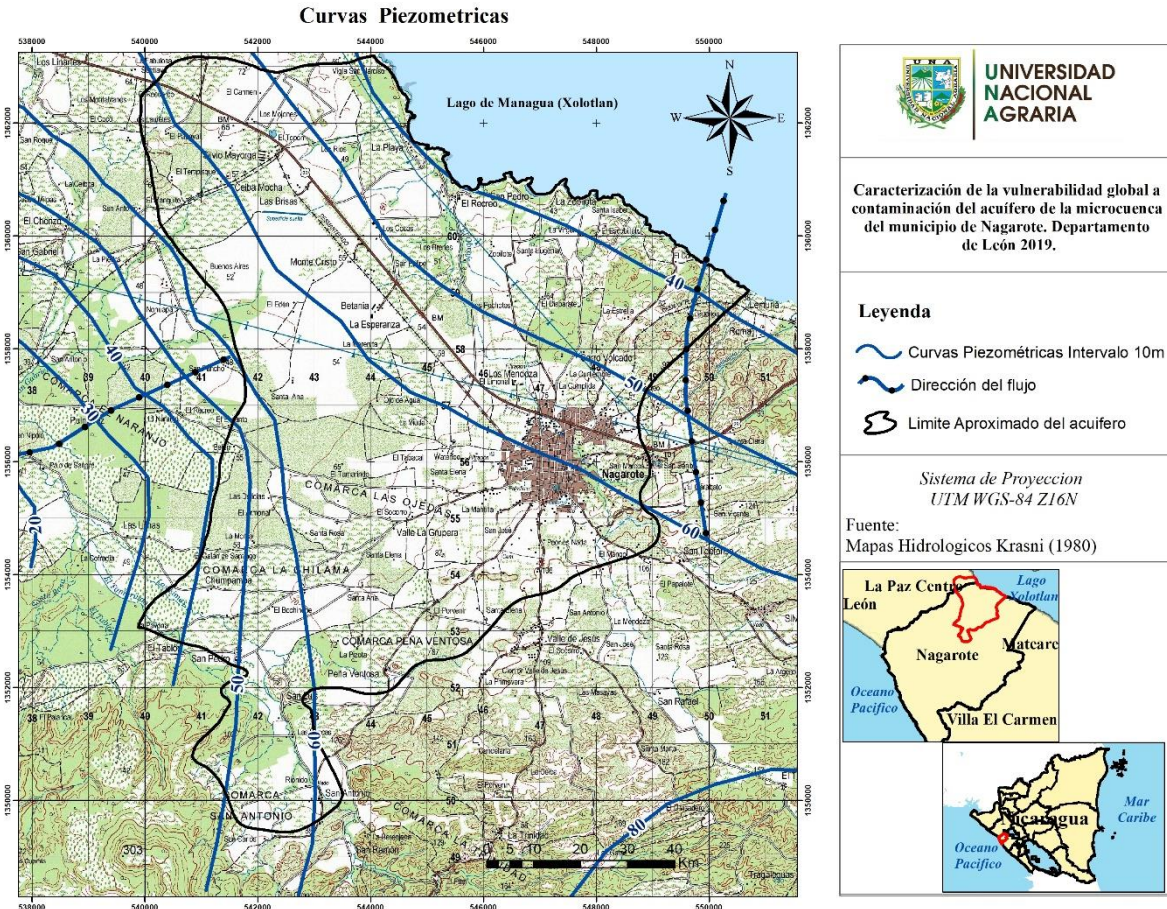


Figura 12. Mapa de curvas piezometrica del acuífero de Nagarote.

4.4. Estimación de la vulnerabilidad del acuífero mediante el Método GOD

El método GOD clasifica la vulnerabilidad en base a un índice cuantitativo asignado a partir de las valoraciones cualitativas. La combinación de los parámetros por medio de una multiplicación, generó como resultado un mapa que subdivide al territorio en tres categorías de vulnerabilidad: extrema, moderada y baja. En el cuadro No 2. se muestra una tabla resumen del cálculo de la vulnerabilidad. Posteriormente se describe cada categoría de vulnerabilidad obtenida, detallando su localización geográfica y características hidrogeológicas que la definen.

Formación Geológica	Grupo Las Sierras (TQps)	Cuaternario Piroclástico (Qv)	Cuaternario Indiferenciado (Q)	Tamarindo Medio (Tmtm)
Grado de confinamiento hidráulico (G)	Caracterización No confinado libre	No confinado	No confinado cubierto	Basamento
	Categoría Extrema	Extrema	Alta	Baja
	Puntuación 1	1	0.7	0
Ocurrencia del sustrato suprayacente (O)	Caracterización tobas líticas, aglomeráticas y pomáceas	cenizas finas, pómez, lapilli, arenas, piroclasto	lava, piroclastos, basalto, pómez, andecitas, fenoandesitas, basalto aluvionico	Areniscas e igmimbritas con espesor de 1 a 2.6m
	Categoría Extrema	Extrema	Alta	Baja
	Puntuación 0.8	0.9	0.8	0
Distancia del nivel del agua (D)	Caracterización Cualquiera	Cualquiera	13 – 24 m	24-50
	Categoría Extrema	Extrema	Moderada	Baja
	Puntuación 1	1	0.75	0-0.1
Vulnerabilidad global	Categoría EXTREMA	EXTREMA	MODERADA	BAJA
	Puntuación 0.8	0.9	0.42	0.1

Cuadro 2. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero a partir de método GOD.

4.4.1. Vulnerabilidad extrema

La zona de vulnerabilidad extrema abarca un área de 49.12 km², equivalente al 60.78 % del área total de la microcuenca. Incluye el casco urbano de Nagarote, las comarcas Peña Ventosa, Comarca Las Ojedas y los poblados Santa Ana, Santa Rosa, Pena Ventosa, San Pedro, Los Mendoza, La cumplida, Carro Volcado, Santa Eugenia, La Zopilota, La Playa y Silvio Mayorga.

Se extiende por las formaciones geológicas Grupo Las Sierras, Cuaternario Piroclástico y Cuaternario Indiferenciado. Se caracteriza por la presencia de depósitos no consolidados de origen volcánico (pómez, lapilli, cenizas finas y arenas), rocas porosas (tobas), fisuradas o fragmentadas (basaltos y andesitas). Sus características geológicas dan origen a acuíferos no confinados, los cuales se encuentran a menos de 20 m de profundidad. En el sector de la Finca La Zopilota, el acuífero se torna libre, brotando en forma de manantial.

De acuerdo las visitas de campo, dentro de sus principales fuentes de contaminación se encuentran actividades agrícolas (monocultivo de caña de azúcar), casco urbano de Nagarote y productos químicos procedentes de tenerías. Según la dirección de flujo del agua subterránea, la carga contaminante afectaría principalmente a la vertiente del Lago de Managua y en menor medida a la del Océano Pacífico. Ver Figura 13.

4.4.2. Vulnerabilidad moderada

La zona de vulnerabilidad moderada abarca un área de 31.15 km², equivalente al 38.53 % del área total de la microcuenca. Incluye las comarcas La Chilama , San Antonio y los poblados Ceiba Mocha, La Chumpampa, Monte Cristo, Betania, San Felipe, San Luis y San Antonio.

Abarca la mayor parte de la formación Cuaternario Indiferenciado. Se caracteriza por la mezcla de depósitos de origen volcánico procedente erupciones volcánicas de distintas fuentes. Estos materiales incluyen depósitos no consolidados (pómez, lapilli, cenizas finas y arenas) y rocas fisuradas o fragmentadas (basaltos y andesitas). Sus características geológicas dan origen a un acuífero no confinado cubierto, el cual oscila entre los 13 a 24 m de profundidad.

De acuerdo las visitas de campo, dentro de sus principales fuentes de contaminación se encuentran actividades agrícolas (monocultivo de caña de azúcar). En menor medida,

contaminantes procedentes de poblados y caseríos. Según la dirección de flujo de agua subterránea, la carga contaminante afectaría principalmente a la vertiente del Océano Pacífico y en menor medida a la del Lago de Managua.

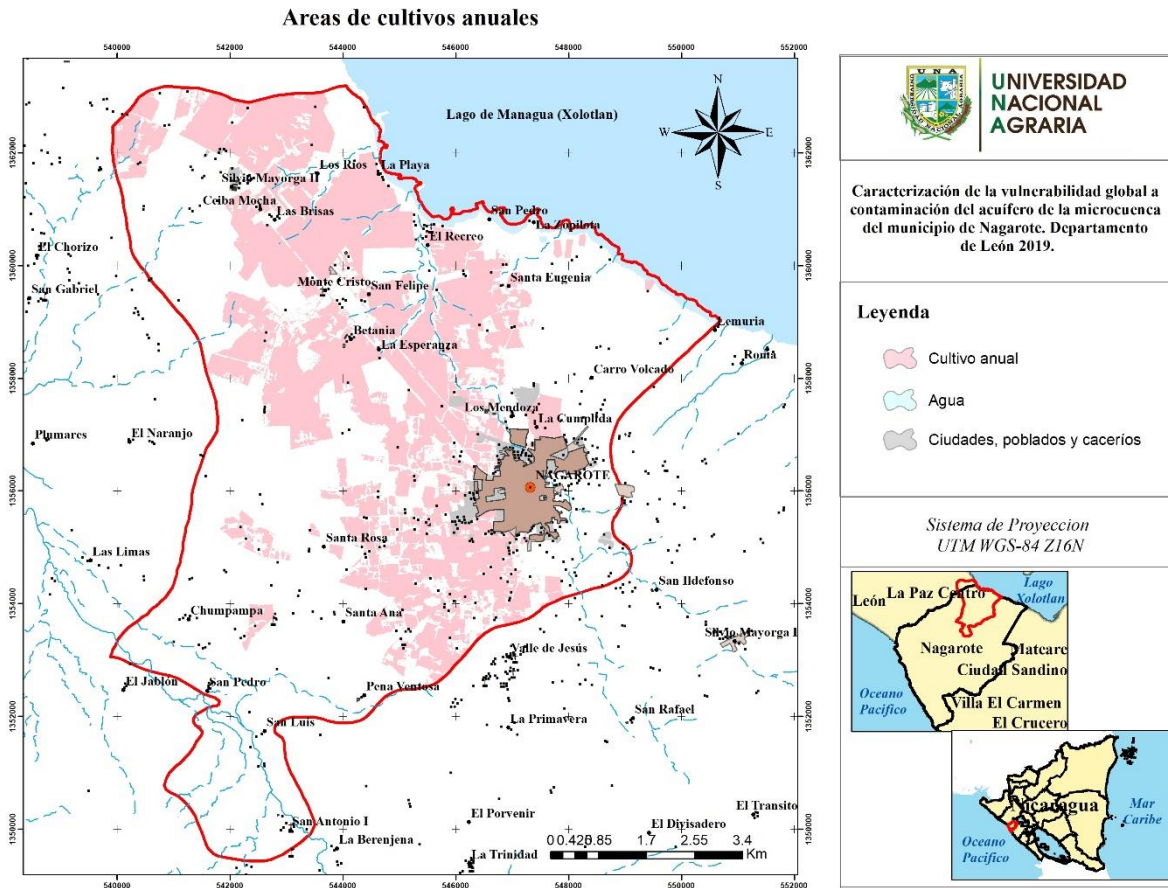


Figura 13. Mapa de Áreas de cultivos anuales

4.4.3. Vulnerabilidad baja

La zona de vulnerabilidad baja abarca un área de 0.55 km², equivalente al 0.69 % del área total de la microcuenca. Incluye los poblados El Tablón y San Carlos, ubicados en el sector Suroeste del área de estudio.

Comprende la formación Tamarindo Medio. Ésta no debe considerarse como un acuífero propiamente dicho, sino más bien, representa el basamento para otras formaciones geológicas. Aunque sus materiales litológicos como areniscas e ignimbritas se encuentran fracturados, sus posibilidades para infiltrar y reservar agua son muy bajas en comparación con las otras formaciones mencionadas.

Esta zona no pudo ser visitada en campo. A partir de información secundaria como mapas topográficos e hidrogeológicos y la ecuación de correlación indicada en el acápite 4.3, se estima que el techo de agua del acuífero se encuentra a más de 20 m de profundidad. Es importante destacar que, de existir contaminación, ésta se moverá por escorrentía afectando la calidad del recurso hídrico superficial en la vertiente del Océano Pacífico.

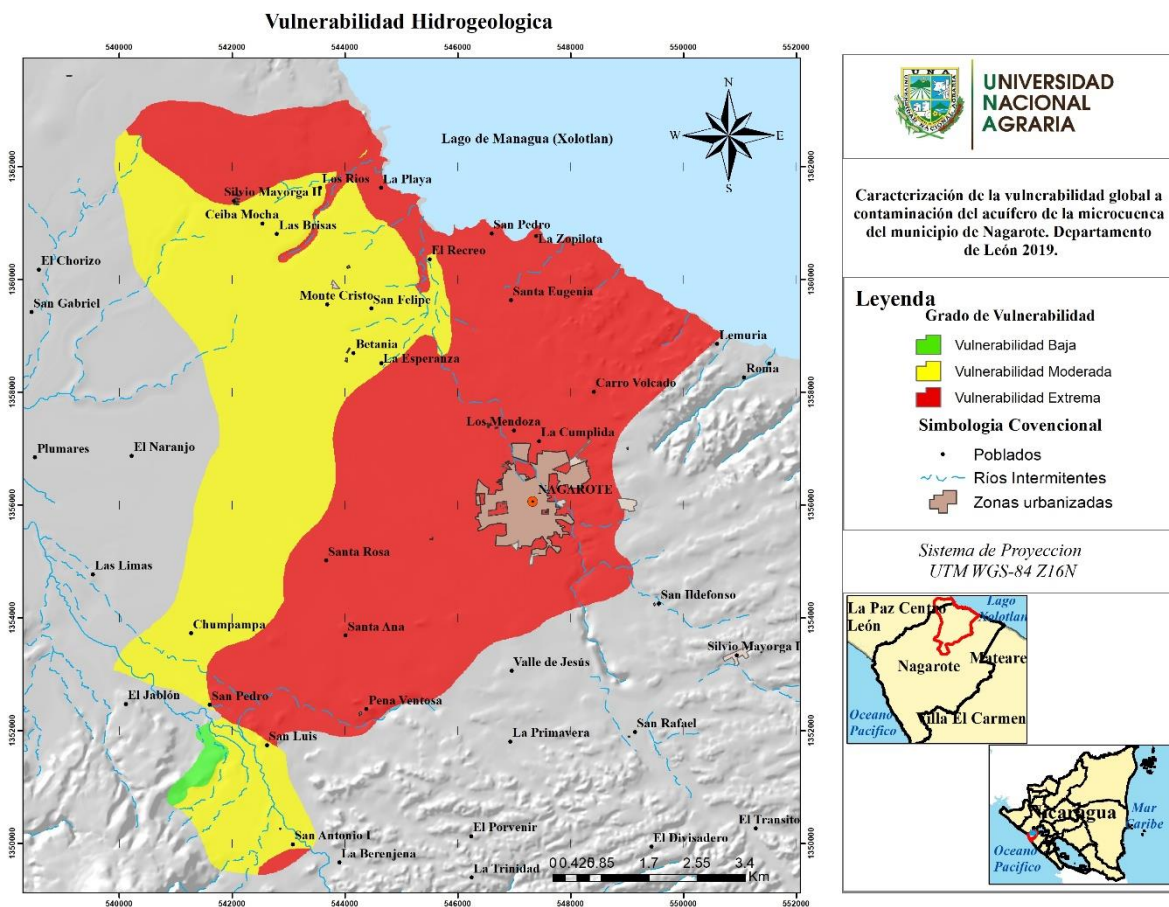


Figura 14. Mapa de Vulnerabilidad hidrogeológica para el acuífero de Nagarote. Fuente: Elaboración Propia.

V. CONCLUSIONES

- La valoración global indica que el acuífero es vulnerable en su totalidad. Aproximadamente el 61% de la microcuenca presenta vulnerabilidad extrema y 38% vulnerabilidad moderada. Sólo el 1% es vulnerabilidad baja.
- Las características de las formaciones geológicas dominantes en el sitio de estudio (Grupo Las Sierras y Cuaternario Piroclástico), compuestas por depósitos volcánicos no consolidados, conglomerados, rocas porosas, fragmentadas y/o fisuradas, propician condiciones óptimas para la recarga de agua subterránea. Pero a la vez, hacen a estos acuíferos moderada a extremadamente vulnerables ante posibles cargas contaminantes.
- La formación Tamarindo medio no constituye acuíferos debido a su composición litológica (tobas andesíticas a riodacíticas, ignimbritas dacíticas ariolíticas) constituyéndose, como basamento confinante subyacente de los acuíferos no confinados.
- La zona de vulnerabilidad extrema incluye el casco urbano de Nagarote y áreas ocupadas por cultivos anuales como: caña de azúcar, maní y sorgo estos usos incrementan la probabilidad de contaminación.
- El mapa de niveles piezométricos nos permite tener una visión espacial o una orientación probable de las direcciones de flujo del agua subterránea y cuáles pueden ser sus posibles impactos al identificar una carga contaminante.
- 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 necesarias para la formulación de planes para la protección del recurso e incidir en mecanismos de control para su aprovechamiento racional.
- La estimación de la vulnerabilidad a contaminación y su mapeo constituyen elementos importantes para la determinación del riesgo, esto nos permite incidir 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.

VI. RECOMENDACIONES

- Se sugiere la utilización del método GOD, por su fácil comprensión y aplicación, a su vez nos genera información robusta en términos de vulnerabilidad hidrogeológica, muy necesaria para la toma de decisiones y orientar medidas de protección a las reservas de aguas subterráneas.
- Realizar los muestreos en diferentes épocas del año, preferiblemente al inicio y final de cada estación, para establecer una ponderación promedio anual de las concentraciones de los niveles de profundidad del agua.
- Elaborar inventarios de focos de contaminación y estudios de amenaza para la valoración de las cargas contaminantes puntuales y difusas que puedan afectar al acuífero y así obtener una aproximación al riesgo de contaminación real del acuífero.
- Desarrollar un plan de monitoreo de la calidad del agua, para realizar una relación entre los resultados del laboratorio contra los diferentes agroquímicos que son utilizados en los cultivos anuales e implementar medidas de protección a las aguas subterráneas.
- Tomar aspectos de este estudio para la construcción de una estrategia de protección al recurso hidrogeológico del municipio de Nagarote y así contribuir a la reducción de los riesgos a contaminación.
- Los resultados de este estudio deben utilizarse, para incidir en las políticas públicas nacionales orientadas a la protección de las aguas subterráneas y de manera particular en propuestas de ordenamiento territorial.
- Incorporar los resultados de este estudio en la planificación prospectiva de cara a la reducción de riesgos hidrogeológicos que puedan afectar la salud de la población.

VII. LITERATURA CITADA

- Kuang, J, S.** 1971. Estudio geológico del pacifico de Nicaragua. Managua Nicaragua, C. A. 101 p.
- Fenzl, N.** 1989. Nicaragua: geografía, clima, geología y hidrogeología.1^{ra} edición-100 ejemplares. UFPA. Belem, Pará, Brasil. 62 p.
- INETER.** 2001. Estudio hidrogeológico e hidroquímicos en la región del pacifico de Nicaragua: Fase 1, Región Chinandega-León-Nagarote. Managua Nicaragua. 52 p.
- Espinoza E, Talavera E, Navarro M y Castellón, A.** 2009. Informe final geología y amenazas geológicas, del sitio planta che guevara 4 municipio de Nagarote. León, Nicaragua. INETER. 48 p.
- Salas E.** 1993. Árboles de Nicaragua. Managua, NI. Instituto Nicaragüense de Recursos Naturales y del Ambiente. 360 p.
- MARENA.** 2000. Estimación del peligro potencial de contaminación en el acuífero de Managua. Nicaragua.70 p.
- Gutiérrez F, Gómez I, Torrez C.** 2011. Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga. Revista de la facultad de ingeniería fisicomecánicas. Volumen 10, No. 1, p. 51.
- Martínez M, Delgado, P y Fabregat V.** 1998. Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23 p.
- López G, Montes J.** 2010. Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de mariona, departamento de san salvador. universidad de el salvador, UES. 2010.
- INETER.** 2015. Mapa de cobertura y uso de la tierra de Nicaragua. 2015.Esc. 1: 750,000. Color.
- INETER.** 2017. Sapefile geología del pacifico de Nicaragua. Hoja 2852-1. Esc. 1: 50, 000. Color.

- Krasny J.** 1989. Mapas hidrogeológicos del pacifico de Nicaragua. Esc. 1: 250, 000. Color.
- INETER.** 2016. Hoja topográfica japonesas. 2852-1. Esc. 1: 50. 000. Color.
- MARENA.** 2002. Elementos básicos para la protección de las aguas subterráneas aplicados en el acuífero de Managua, Nicaragua.(en línea) Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/280986078 Elementos basicos para la proteccion de las aguas subterranas aplicados en el acuifero de Managua Nicaragua](https://www.researchgate.net/publication/280986078_Elementos_basicos_para_la_proteccion_de_las_aguas_subterranas_aplicados_en_el_acuifero_de_Managua_Nicaragua)
- Hirata R.** 2002. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. guía para empresas de agua, Y autoridades municipales y agencias ambientales. Disponible en <https://www.google.com.ni/webhp?sourceid=chromeinstant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=hirata+2002>
- FAO.** 2003. Los Recursos Hídricos de Nicaragua. Disponible en. [https:// coin.fao.org/coin-static/cms/media/5/.../fao_nic_recursohidricos_cepal.Pdf](https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/5/.../fao_nic_recursohidricos_cepal.Pdf)
- Montaño J, Gagliardi, S y Montaño M.** 2004. Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero mercedes en el área metropolitana de la ciudad de paysandú – comparación de los métodos god y drastic(en línea). Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.4, p.35-45, 2004. Disponible en <https://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/download/2646/2187>
- Foster S, Hirata R, Paris M.** 2007. Protección de la calidad del agua subterránea. (en línea). guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales.115 p. Disponible en <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Marín E.** 1972. Inventario de los Recursos Naturales y geología de la región del pacifico de Nicaragua. (en línea). Revista de temas Nicaragüenses. <http://www.temasnicas.net/split109/geologiapacifico.pdf>
- Barahona T, Rivera A y Chávez R.** 2013. Diseño de abastecimiento de agua potable para la comunidad Miramar Nagarote, León, para. 240 p.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Total, de área de las formaciones geológicas

Formaciones Geología	Área Ha	% de Área
Las Sierras	4,213.76	52.12
Cuaternario Piroclastico	532.93	6.59
Cuaternario Indiferenciado	3,282.14	40.60
Tamarindo Medio	55.5	0.69
Total	8,084.40	100%

Anexo 2. Características Hidrogeológicas (Norbert Fenzl 1989).

Formación	Litología	Tipos de Roca
TQps Las Sierras	Tobas líticas, Aglomeraticas y pomáceas	Tobas líticas, aglomeráticas y pomáceas
Qv Piroclastos	Cenizas Finas, Pómez, Lapilli, Arenas piroclasto	Piroclásticos Volcanicos
Q Indiferenciado	Lava, rocas piroclasto, basalto, Pómez, Andecitas, Fenoandesitas, Basalto aluvionico.	Sedimentario Indiferenciado
TmTm Tamarindo	Tobas andesíticas a riodacíticas, ignimbritas dacíticas a riolíticas.	Tobas andesíticas a riodacíticas, ignimbritas dacíticas a riolíticas

Anexo 3. Definición de la clase de Vulnerabilidad hidrogeológica.

Definición práctica de la clase de vulnerabilidad a contaminación de los acuíferos	
Clase de Vulnerabilidad	Definiciones
Extrema	Vulnerable a la mayoría de contaminantes Con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (Excepto a los que son fuertemente absorbidos o fuertemente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.

Baja	Solo vulnerable conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Anexo 4. Porcentaje de vulnerabilidad hidrogeológica del área del estudio.

Cobertura Y uso de suelo	Área ha	Porcentaje
Agua	110.23	1.36
Bosque Latifoliado Denso	141.68	1.75
Bosque Latifoliado Ralo	242.18	3
Ciudades y poblados	288.48	3.57
Cultivo Anual	2497.08	30.82
Humedal	12.28	0.15
pasto	1891.36	23.40
Suelo sin vegetación	101.01	1.25
Tacotal	485.69	6.01
Vegetación arbustiva	2324.77	28.70
Total	8,084.40	100 %

Anexo 5. Granulometría de la Litología encontrada en el sitio.

Litología	Granulometría
Cenizas	Composición de partículas y rocas de mineral muy finas < 2mm de Diámetro.
Pómez	Granulometría con un diámetro mayor a 4 mm
Lapilli	Expulsado por volcán en erupción diámetro 2, a 64 mm.
Tobas Líticas	Fragmentos de rocas de 4 a 32 mm.
Ignimbritas	Granulometría estructural de 1mm de diámetro.
Andesita	Rocas volcánicas color gris, con un diámetro de 1/16 a 2 mm.
Riodacitas	Granulometría de 3 a 5 mm de diámetro.
Escoria Basáltica	Con tamaño y contorno variable de 30 mm a 10.
Arena Volcánica	Son elementos muy finos no mayores de 2mm.
Lavas	Diámetros máximos de 3 mm en su composición estructural.
Basalto Alivinico	Diámetro de hasta 1.0 m.
Tobas Dacitas	Comprendido en una estructura de 1/15 a 2 mm de diámetro

Anexo 6. Porcentaje de área de vulnerabilidad del acuífero.

Clase de Vulnerabilidad	Área Ha	% de Vulnerabilidad
Extrema	4,912	60.78
Moderada	3,115	38.53
Baja	55.5	0.69
Total	8,083.40	100%

Anexo 7. Formato de recolección de datos de campo.

Fecha	Actividad	Comunidad	Parámetro a medir.	Evaluación biofísica de los lugares muestreados.	Uso del recurso	Observaciones

Anexo 8. Formato de recolección de datos de pozos.

Datos del pozo							
Elevación del pozo en msnm	Coordenadas (UTM-WGS)	Característica del pozo		Profundidad del pozo en mts	Profundidad al techo de agua en periodo Lluvioso ⁴ .	Profundidad al techo de agua en periodo seco.	Usos del pozo
		Perforado	Excavado				

⁴ Este campo se completó en base a consultas realizadas al propietario del pozo.

Anexo 8. GLOSARIO

Agua Subterránea

Es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales

Acuífero

Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua. El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico.

Acuíferos no confinados libres

Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por de saturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros.

Acuíferos confinados

Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero.

Acuíferos semiconfinados

Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua.

Hidrogeología

Estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en las zonas saturada y no saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre.

Permeabilidad

Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua; es decir, un estrato geológico siendo poroso puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula.

Porosidad

Como las rocas no son completamente sólidas (poseen grietas o espacios intergranulares), y al conjunto de estas aberturas o intersticios se le llama porosidad.

Transmisibilidad o Trasmisividad

Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo.

Método GOD

El método GOD (por sus iniciales en inglés: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table; es una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos y ha sido ampliamente probado en América Latina y el Caribe, debido a su claridad conceptual y a su simplicidad de aplicación.

Vulnerabilidad Hidrogeológica

Según, FOSTER y HIRATA (1991) la “vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad natural para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta”. En este caso al citar a una carga contaminante impuesta, por lo que refieren a una contaminación de origen artificial.

VRBA y ZAPOROZEC (1994) definen a la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”.

Mapas de Vulnerabilidad Hidrogeológicos

Es la representación gráfica de la vulnerabilidad sea intrínseca u específica de los acuíferos subterráneos y sirven como un instrumento auxiliar para orientar adecuadamente las decisiones relacionadas con la protección de estos recursos.

