

## Artículo científico

## Caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa, Nicaragua, mediante el uso del método DRASTIC.

Amílcar Josué Ramos Valle

ENACAL

Dirección para recibir correspondencia: [amilkarramos09@gmail.com](mailto:amilkarramos09@gmail.com)

Recibido 30.10.2019 Aceptado 27.11.2019

### Resumen

Este artículo trata de la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa ubicado en el departamento de León Nicaragua, la cual fue caracterizada por el método DRASTIC siendo este, un método empírico desarrollado por Aller, Bennet, Lehr, Petty, & Hackett, (1987) y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada, fue nombrado de esta forma, alusivo a los siete parámetros (por sus siglas en inglés) que se superponen para caracterizar geográficamente la vulnerabilidad hidrogeológica. 1) *La profundidad del agua subterránea* en el acuífero varía entre los 1.5 – 23 m. 2) *La recarga neta* en todo el acuífero es mayor a los 254 mm/año. 3) y 4) el *medio del acuífero* y la *zona vadosa* en el área de estudio están compuestas de las mismas formaciones geológicas siendo estas; cuaternarias (Qal – r) y el Grupo Coyol (Tmca), las rocas formadoras de la fuente subterránea. 5) en el *medio del suelo* se forma por suelos delgados o ausentes y suelos arenosos. 6) la *topografía* del terreno varía entre 0 y > 18 %, predominando las pendientes suaves en todo el valle. 7) la conductividad hidráulica oscila entre 0.04 – 40, prevaleciendo los rangos 15.1 – 30 y 30.1 – 40 m/día.

En la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica obtenida, a través del método DRASTIC, se edificaron cinco índices: insignificante, baja, moderada, alta y muy alta, el índice de mayor y menor valor numérico DRASTIC fue 78 y 191, respectivamente. El índice que predomina es el de baja vulnerabilidad, con un área de 8.55 km<sup>2</sup>, correspondiente al 34.8 %. Los índices de extrema y alta vulnerabilidad corresponden 6.80 km<sup>2</sup> y 2.56 km<sup>2</sup> respectivamente, equivalente al 27.7 % y 10.4 % de la superficie del acuífero. La vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento fundamental en la planificación y aprovechamiento hídrico, sin embargo no deberá ser el único criterio para la toma de decisiones relacionadas al agua subterránea dentro del acuífero del valle de Achuapa, si deberá ser la base principal para para otros estudios hidrogeológicos de mayor envergadura.

**Palabras claves:** Vulnerabilidad hidrogeológica, acuífero, profundidad del agua subterránea, transmisividad y conductividad hidráulica.

### Abstract

This article deals with hydrogeological vulnerability in the Achuapa Valley aquifer located in the department of León Nicaragua, which was characterized by the DRASTIC method being this, an empirical method developed by Aller, Bennet, Lehr, Petty, & Hackett, (1987) and sponsored by the United States Environmental Protection Agency (EPA). This method seeks to systematize the determination of the potential of pollutants to reach the saturated zone, it was named in this way, alluding to the seven parameters (for its acronym in English) that overlap to geographically characterize the hydrogeological vulnerability. 1) The depth of groundwater in the aquifer varies between 1.5 - 23 m. 2) The net recharge throughout the aquifer is greater than 254 mm / year. 3) and 4) the aquifer environment and the vadose area in the study area are composed of the same geological formations being these; Quaternary (Qal - r) and the Coyol Group (Tmca), the formation rocks of the underground source. 5) In the middle of the soil it is formed by thin or absent soils and sandy soils. 6) The topography of the land varies between 0 and > 18%, with gentle slopes prevailing throughout the valley. 7) Hydraulic conductivity ranges from 0.04-40, with ranges 15.1 - 30 and 30.1 - 40 m / day prevailing.

In the characterization of the hydrogeological vulnerability obtained, through the DRASTIC method, five indexes were built: insignificant, low, moderate, high and very high, the index of greater and lesser numerical value DRASTIC was 78 and 191, respectively. The predominant index is that of low vulnerability, with an area of 8.55 km<sup>2</sup>, corresponding to 34.8%. The indexes of extreme and high vulnerability correspond to 6.80 km<sup>2</sup> and 2.56 km<sup>2</sup> respectively, equivalent to 27.7% and 10.4% of the surface of the aquifer. Hydrogeological vulnerability is a fundamental instrument in planning and water use, however it should not be the only criterion for making decisions related to groundwater within the aquifer of the Achuapa Valley, but should be the main basis for other hydrogeological studies larger.

**Keywords:** Hydrogeological, aquifer vulnerability, groundwater depth, transmissivity and hydraulic conductivity.

## Introducción

El agua subterránea es un bien común natural y renovable vital para el desarrollo socioeconómico de cualquier país, región o continente, el subsuelo almacena aproximadamente el 22 % del agua dulce disponible en el planeta tierra, equivalente a 13, 050,000 km<sup>3</sup>, Much, 2018 (citado en curso de química y microbiología del agua, ERIS – USAC 2018).

El objeto del presente artículo es caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa, a través del método DRASTIC, siendo este, un método empírico desarrollado por Aller, Bennet, Lehr, Petty, & Hackett, (1987) y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada, fue nombrado de esta forma, alusivo a los siete parámetros (por sus siglas en inglés) que se superponen para caracterizar geográficamente la vulnerabilidad hidrogeológica.

El acuífero del valle de Achuapa tiene un área estimada en 25 km<sup>2</sup>, se ubica en la parte norte – central de Nicaragua, en la zona geomorfológica conocida como: “Tierras altas del interior” (Fenzel, 1989, pág. 5), litológicamente está compuesto por rellenos coluvio aluviales del cuaternario Qal – r, (INETER, 2004) la profundidad del agua subterránea es variable encontrándose entre 1.5 y 23 m, (Ramos A. , 2019) así como el espesor de la zona saturada el cual alcanza más de 50 m en la parte central del valle, (Traña, Vázquez, & Bobadilla, 2002).

## Descripción del área de estudio

El municipio de Achuapa está localizado en la zona norte del departamento de León, al cual pertenece.

Está ubicado entre las coordenadas 13° 03 ‘de latitud norte y 86°35’ de longitud oeste, la altitud media del municipio es de 330 msnm, su extensión territorial es de aproximadamente 416.24 km<sup>2</sup>. El casco urbano del municipio de Achuapa se sitúa a 120 km de la cabecera departamental de León y 210 km de la ciudad capital Managua.

Achuapa colinda al norte con el municipio de San Juan de Limay, del departamento de Estelí, al sur con El Sauce, del departamento de León; al este con el municipio de Estelí, perteneciente el departamento del mismo nombre, y al oeste con Villanueva, municipio del departamento de Chinandega.

El acuífero del valle de Achuapa cubre una extensión territorial aproximada 25 km<sup>2</sup> (5.96 % del área total del municipio), se localiza entre las coordenadas UTM-WGS 84, 1444768 N; 539140 E, y 1443161 N, 546861 E, zona 16 Norte, comprendido entre las cotas 300 y 340 msnm, a una elevación promedio de 309 msnm. Hidrográficamente el acuífero del valle de Achuapa se ubica en la cuenca del Río Estero Real, la cual fue identificada con el código 60 en el proyecto en el proyecto hidrometeorológico centroamericano (INETER, 1972). La ubicación exacta del acuífero del valle de Achuapa se puede observar en la Figura 1.

**Figura 1: Ubicación del acuífero del valle de Achuapa.**



**Antecedentes**

En la mayor parte de los acuíferos importantes de cada continente, región o país, se han llevado a cabo análisis de vulnerabilidad hidrogeológica, utilizando metodologías que se adecuan a las condiciones naturales del lugar. Canadá, Estados Unidos de América, Portugal, Italia, entre otras, han desarrollado esta herramienta en función de la gestión y toma de decisión referido al aprovechamiento del agua subterránea

El acuífero del valle de Achuapa es la fuente de agua más confiable en el municipio, de este se extrae el recurso para el abastecimiento público, riego agrícola y ganadería, por lo que existe una alta dependencia de los diferentes sectores productivos de la población sobre el recurso acuático, siendo la buena calidad de este, un índice de progreso dentro de la municipalidad.

En el presente artículo, se evaluó la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del valle de Achuapa, siendo el estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región central de Nicaragua, (INETER – COSUDE, 2004) y exactamente el mapa hidrogeológico de la hoja Estelí a escala 1:250,000, la mayor referencia bibliográfica.

Para la obtención de la profundidad del agua subterránea, se realizó inventario *in situ* de pozos perforados y excavados el mes de enero del 2019, con base al estudio geofísico realizado en la mapificación de la región central – hoja Estelí (Traña, Vázquez, & Bobadilla, 2002), y pozos perforados por el

ENACAL, se obtuvo el espesor y litología de las variables, tipo de acuífero e impacto en la zona vadosa.

Tomando en cuenta que las diferentes actividades económicas en el municipio de Achuapa, dependen en gran medida de la oferta hídrica que almacena el valle y el deterioro ambiental que han sufrido los valles intramontanos, nace la necesidad de caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, sobre en aquellos acuíferos que, debido a sus condiciones naturales, son más susceptibles a la contaminación antropogénica.

Foster (1987), define que vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante.

**Metodología**

Debido a que en el acuífero del valle de Achuapa, se disponía de información suficiente para desarrollar el método DRASTIC y sabiendo la gran aceptación que tiene este en la comunidad científica, se eligió sobre otras metodologías.

El DRASTIC (Aller et al. 1987), busca evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, de acuerdo a las propiedades naturales de los parámetros considerados, siendo 10 al valor de máxima asignado. Cada variable se clasificará, según las características intrínsecas de medio (r), para posteriormente multiplicarse por el valor de ponderación (w), el cual varía de 1 a 5 establecido en la metodología, tal como se muestra en la Tabla 1.

La metodología DRASTIC utiliza siete parámetros en la determinación de la vulnerabilidad, las variables independientes conforman su acrónimo, siendo estas:

**Depth:** Profundidad del agua subterránea

**Recharge:** Recarga neta

**Aquifer:** Medio del acuífero

**Soil:** Medio del suelo

**Topography:** Topografía

**Impacto of zone vadoso:** Impacto en la zona vadosa

Hydraulic conductivity: Conductividad hidráulica

La ecuación utilizada en es la siguiente:

$$DRASTIC = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

r = clasificación.

w = peso.

**Tabla 1: Peso asignado a cada parámetro, según su importancia.**

| Parámetro |                                  | Peso |
|-----------|----------------------------------|------|
| <b>D</b>  | Profundidad del agua subterránea | 5    |
| <b>R</b>  | Recarga neta                     | 4    |
| <b>A</b>  | Medio del acuífero               | 3    |
| <b>S</b>  | Medio del suelo                  | 2    |
| <b>T</b>  | Topografía                       | 1    |
| <b>I</b>  | Impacto en la zona vadosa        | 5    |
| <b>C</b>  | Conductividad hidráulica         | 3    |

La metodología agrupa índices de vulnerabilidad hidrogeológica y los clasifica según su valor numérico DRASTIC (VND), Aller *et al* (1987), establece dichos rangos los cuales son presentados en la Tabla 2, estos pueden ser modificados a discreción y criterio del investigador, sin embargo, se recomienda utilizarlos según lo establecido por los autores.

**Tabla 2: Clasificación de la vulnerabilidad**

| Índice DRASTIC |                               |
|----------------|-------------------------------|
| < 100          | Vulnerabilidad insignificante |
| 101 - 119      | Vulnerabilidad muy baja       |
| 120 - 139      | Vulnerabilidad baja           |
| 140 - 159      | Vulnerabilidad moderada       |
| 160 - 179      | Vulnerabilidad alta           |
| 180 - 199      | Vulnerabilidad muy alta       |
| > 200          | Vulnerabilidad extrema        |

Los pasos metodológicos realizados para obtener el valor de cada una de las variables en el presente artículo fueron realizados de la siguiente manera:

**Profundidad del agua subterránea (D):** En la caracterización de esta variable, se utilizó la información recopilada *in situ* en pozos perforados y excavados, correspondiente a la profundidad del agua subterránea.

**Recarga neta (R):** La estimación de la recarga se realizó con base al “Mapa de distribución de la tasa de infiltración máxima estimada (en mm/mes) sobre la distribución de Grupos Litológicos definida para Nicaragua en el PNRH 2017” (PNRH, 2017, pág. 59) y el dato de precipitación media anual, suministrado por la estación PV Achuapa. (INETER, 1963 - 2010).

**Medio del acuífero (A):** La caracterización de esta variable se realizó utilizando el mapa geológico del acuífero, descripciones litológicas de pozos perforados por ENACAL y los SEV realizados en el Estudio Geofísico para el Proyecto Mapificación Hidrogeológica de la Región Central – Hoja Estelí, (Traña et al, 2002, págs. 10, 25, 26).

**Medio del suelo (S):** Este parámetro se obtuvo del mapa de suelos de la república de Nicaragua, (MAG et al., 2015), donde se describió de forma general órdenes y subórdenes de suelos.

**Topografía (T):** Para la determinación de este parámetro, se elaboró un modelo de elevación digital (DEM), tomando como base curvas de nivel del área de estudio, usando un sistema de información geográfica (SIG), se elabora un mapa de pendiente (%), para después reclasificarlo según indica la metodología.

**Impacto en la zona vadosa (I):** El análisis de la zona vadosa, se analizó de igual forma que el parámetro del medio del acuífero, por lo que se utilizó la misma fuente de información.

**Conductividad hidráulica (C):** Este parámetro fue determinado utilizando la ecuación  $K = T/m$  (donde:

T = Transmisividad (m<sup>2</sup>/día).

K = Conductividad hidráulica.

m = Espesor saturado (m).

## Resultados

### Evaluación de cada parámetro contemplado por el método.

**Profundidad del agua subterránea (D):** La profundidad del agua subterránea en el acuífero del valle de Achuapa es variable, encontrándose entre los 1.5 y 23 m, esta se agrupo en cuatro diferentes rangos, clasificándose de acuerdo a la metodología DRASTIC, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3: Clasificación de la profundidad del agua**

| Rangos de Profundidad (m) | Clasificación Dr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|---------------------------|------------------|------|------------------------------|
| 1.3 - 4.6                 | 9                | 5    | 45                           |
| 4.7 - 9.1                 | 7                | 5    | 35                           |
| 9.2 - 15                  | 5                | 5    | 25                           |
| 15.1 - 23                 | 3                | 5    | 15                           |

### Recarga neta (R):

Según Tabla IV “Valores de infiltración máxima obtenidos de los valores de permeabilidad vertical para grupos litológicos de Nicaragua” (PNRH, 2017), la infiltración máxima en el acuífero del valle de Achuapa, se estima sea de 1999 mm/mes. (PNRH, 2017, pág. 59), por lo que se utilizó este dato en la determinación de esta variable, resultando una única área, la cual fue clasificada como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4: Clasificación de la recarga**

| Recarga (mm/año) | Clasificación Rr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|------------------|------------------|------|------------------------------|
| > 254            | 4                | 9    | 36                           |

**Medio del acuífero (A):** El acuífero de Achuapa está compuesto por dos formaciones geológicas diferentes, estas son; los rellenos coluvio aluviales del cuaternario (Qal – r), litológicamente estas compuestos por gravas, arenas, bolones, guijarros y suelos arenosos principalmente y las rocas volcánicas del Grupo Coyol, compuestas litológicamente por Ignimbritas, lavas basálticas – andesitas y piroclásticas, alteradas y fracturadas.

Los materiales coluvio aluviales del cuaternario (Qal – r), cubren aproximadamente el 40 % del acuífero y se ubican al centro de este, así mismo las rocas volcánicas del grupo Coyol se extienden alrededor del 60 % siendo la frontera entre la roca permeables y la impermeable.

A los 700 m del casco urbano del municipio de Achuapa, existe un afloramiento de roca intrusiva intermedia (Tii). Este tipo de formaciones geológicas son incapaces de almacenar agua, no obstante, al estar dentro del valle, se tomó en cuenta.

La clasificación asignada a esta variable se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5: Clasificación del medio del acuífero**

| Tipo de acuífero                                                                                                    | Clasificación Dr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------|------------------------------|
| Sedimentos recientes: Arena, grava y suelos arenosos.                                                               | 8                | 4    | 32                           |
| Rocas volcánicas: Ignimbritas, lavas basálticas – andesitas y piroclásticas, alteradas y fracturadas (Grupo Coyol). | 6                | 4    | 24                           |
| Intrusivos intermedios (Tii).                                                                                       | 2                | 4    | 8                            |

**Medio del suelo (S):** Esta variable se obtuvo del mapa de suelos de la república de Nicaragua (MAG et al., 2015), clasificando al medio del suelo según la metodología DRASTIC en dos grupos, los cuales fueron; delgado o ausente y suelos arenosos.

El suelo delgado o ausente representa el 10 % del área de estudio y los suelos arenosos cubren el 90 % del acuífero, la clasificación de estos se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6 Clasificación del medio del suelo**

| Tipo de suelo     | Clasificación Sr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|-------------------|------------------|------|------------------------------|
| Delgado o ausente | 9                | 2    | 18                           |
| Arena             | 8                | 2    | 16                           |

**Topografía (T):** La pendiente influye en el tiempo de permanencia del agua sobre la superficie del suelo, en terrenos accidentados el agua transitará con mayor rapidez que en terrenos planos, por lo que esa condición afectará gradualmente la infiltración de un agente contaminante al acuífero.

Para la determinación de este parámetro, se elaboró un modelo de elevación digital (DEM), tomando como base las curvas de nivel del área de estudio, posteriormente se clasificó la variable según lo establecido en la metodología DRASTIC, tal como se observa en la Tabla 7.

**Tabla 7 Clasificación de la topografía**

| Pendiente (%) | Clasificación Sr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|---------------|------------------|------|------------------------------|
| 0 – 2         | 10               | 1    | 10                           |
| 2 – 6         | 9                | 1    | 9                            |
| 6 – 12        | 5                | 1    | 5                            |
| 12 – 18       | 3                | 1    | 3                            |
| > 18          | 1                | 1    | 1                            |

**Impacto en la zona vadosa (I):** Se ubica entre suelo y la zona saturada, la variable es de vital importancia en los procesos de atenuación ya que los posibles contaminantes transportados por el agua, tendrán forzosamente que transitar por estas capas geológicas, las cuales, dependiendo su estructura, servirán como filtro natural, reteniendo o facilitando el paso a dichas sustancias.

Litológicamente la zona vadosa está compuesta por los mismos materiales geológicos que la variable “A” (medio del acuífero), por lo que la determinación de ambos parámetros fue de igual forma, adecuados según la metodología DRASTIC. En la Tabla 8 se muestran la clasificación de dicha variable.

**Tabla 8: Clasificación de la zona vadosa**

| Tipo de acuífero                                                                                                     | Clasificación Dr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------|------------------------------|
| Sedimentos recientes: Arena, grava y suelos arenosos.                                                                | 8                | 5    | 40                           |
| Rocas volcánicas: Ignimbritas, lavas basálticas – andesitas y piroclásticas, alteradas y fracturadas (Grupo Coyoil). | 6                | 5    | 30                           |
| Intrusivos intermedios (Ti).                                                                                         | 2                | 5    | 10                           |

**Conductividad hidráulica (C)**

Este variable fue determinado utilizando la ecuación  $K = T/m$ . Los rangos de transmisividad, se tomaron del informe final “Estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región Central de Nicaragua” (INETER, 2004, pág. 47). La profundidad del basamento hidrogeológico se obtuvo de los SEV 36 realizados en el estudio geofísico de la mapificación de la región central – hoja Estelí (Traña, Vázquez, & Bobadilla, 2002). En sitios específicos donde se desconocía el espesor del acuífero, se realizó estimación, según apreciación del autor, en la Tabla 9 se muestra los rangos obtenidos para dicha variable.

**Tabla 9: Clasificación de la conductividad hidráulica**

| Rangos (m/día) | Clasificación Cr | Peso | Valor numérico DRASTIC (VND) |
|----------------|------------------|------|------------------------------|
| 0.04 - 5       | 1                | 3    | 3                            |
| 5.1 - 15       | 2                | 3    | 6                            |
| 15.1 - 30      | 4                | 3    | 12                           |
| 30.1 - 40      | 6                | 3    | 18                           |

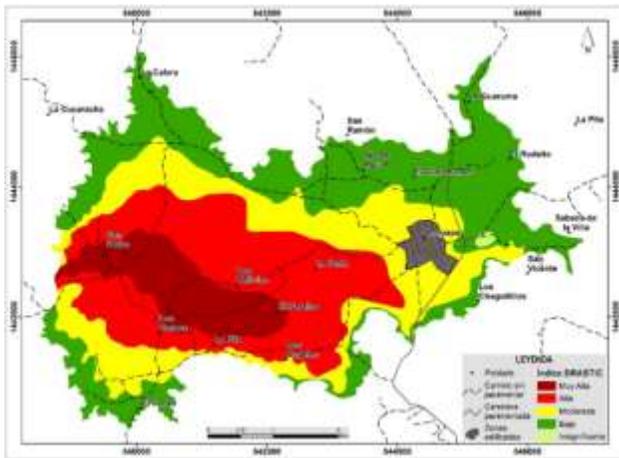
Los resultados obtenidos fueron reclasificados, según el índice de vulnerabilidad propuesto por la metodología DRASTIC (ver Tabla 2), obteniendo el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica con 5 rangos diferentes, las cuales varían de insignificante hasta muy alta vulnerabilidad, los índices agrupados, así

como las áreas que comprenden cada uno de estos, se muestran en la Figura 2 y Tabla 10.

**Tabla 10: Índices de vulnerabilidad DRASTIC.**

| Índice    | Vulnerabilidad | Área (km2) | Porcentaje |
|-----------|----------------|------------|------------|
| 79 - 85   | Insignificante | 0.05       | 0.2%       |
| 120 - 139 | Baja           | 8.55       | 34.8%      |
| 140 - 159 | Moderada       | 6.59       | 26.8%      |
| 160 - 179 | Alta           | 6.80       | 27.7%      |
| 180 - 191 | Muy alta       | 2.56       | 10.4%      |
|           |                | 25         | 100%       |

**Figura 2: Caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica**



## Análisis de resultados

### Vulnerabilidad insignificante

Esta área la constituye los valores numéricos DRASTIC (VND), que van desde 79 hasta 85 tal como se muestra en la Tabla 10 y Figura 2, comprende básicamente un afloramiento de roca intrusiva intermedia (Tii). Este tipo de formaciones geológicas son incapaces de almacenar agua, no obstante, al estar dentro del valle, se tomó en cuenta.

### Vulnerabilidad baja

Está comprendida por los índices DRASTIC 120 a 139, en esta zona se localizan las aguas de mayor profundidad dentro del valle, las cuales varían entre los 15 y 23 m (ver Tabla 3).

Así mismo, existe semi confinamiento en la parte noreste del acuífero, evidenciado al momento de perforar el pozo Tamagás reemplazo propiedad del ENACAL; además, el material litológico de la zona no saturada y saturado está compuesto por materiales del Grupo Coyol, los cuales poseen mayores elementos de atenuación con respecto a las formaciones cuaternarias.

Por otra parte, las pendientes del terreno son mayores > 18 %, limitando de esta forma la permanencia del agua sobre el terreno, también esta zona se ubica en el límite del acuífero, siendo esta, el área de transición rocas recientes permeables y rocas más antiguas e impermeables, por lo que la conductividad hídrica es menor con relación a otros lugares del valle.

El área de moderada vulnerabilidad la componen los índices comprendidos entre 140 y 159, como se muestra en la Figura 2, la textura del suelo es de tipo franco arenoso, por lo que, presentando buena permeabilidad, facilitando de esta forma el transporte de sustancias hacia subsuelo.

### Vulnerabilidad moderada

Por otro lado, se presentan 2 sitios con diferentes pendientes. El primero varía entre de 0 a 2 %, siendo este un suelo a nivel, por lo que el agua permanecerá mayor tiempo sobre la superficie del terreno, lo que podría incidir en la introducción de contaminantes al subsuelo. En el segundo sitio, la pendiente varía entre 2 y 6 %, correspondiendo a terrenos ligeramente inclinados y posiblemente afectados por la erosión hídrica en zonas de escasa cobertura vegetal, así como se observa en la Tabla 7.

El medio del acuífero y la zona vadosa están compuesta por rocas pertenecientes al grupo Coyol de tipo andesita, dacita y basalto principalmente y la profundidad del agua subterránea, esta se encuentra entre los 9 y 15 m. Así mismo, la conductividad hidráulica varía entre los 5 y 30 m/día.

Los parámetros que marcan la diferencia en la clasificación de este índice son: Impacto en la zona vadosa, medio del suelo y la profundidad del agua subterránea.

## Vulnerabilidad alta

El área de alta vulnerabilidad está constituida por los índices que van desde los 160 hasta 179, como se ilustra en la Figura 2. En esta superficie, la textura del suelo es de tipo franco arenoso, los parámetros de la zona vadosa y el medio del acuífero, los componentes materiales cuaternarios (gravas, arenas, bolones, guijarros y suelos arenosos principalmente), tal como se observa en las Tablas 5 y 8.

El agua subterránea se encuentra entre los 4 a 9 m de profundidad, también la conductividad hidráulica es la de mayor valor en todo el valle (30 – 40 m/día). La pendiente del terreno varía entre 0 y 2 %, por lo que el movimiento del agua será principalmente vertical y no horizontal, debido al tipo de formación geológica.

## Vulnerabilidad muy alta

Esta zona está constituida por los índices que van desde 180 hasta 191, como se muestra en la Figura 2 y Tabla 10, las condiciones hidrogeológicas son iguales a las presentes en el área de alta vulnerabilidad, con la salvedad que la profundidad del agua, se encuentra menor de 5 m.

## Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica

El mapa de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del valle de Achuapa, refleja áreas con diferentes niveles de sensibilidad relativa a la contaminación. Si bien la vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento fundamental en la planificación y gestión adecuada del agua subterránea; no deberá ser el único criterio para la toma de decisiones relacionadas al recurso hídrico, si uno de los más importantes.

La vulnerabilidad hidrogeológica puede relacionarse con la posible carga contaminante impuesta por las diferentes actividades antropogénicas y de esta forma obtener el riesgo de contaminación al agua subterránea.

Es importante señalar que el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento de gran utilidad en el acuífero del valle de Achuapa, el cual servirá para:

- Priorizar áreas donde la protección del agua subterránea es de vital importancia.

- Identificar áreas donde se justifique una atenuación especial o esfuerzos encaminados a la protección del agua subterránea.
- Identificar áreas donde los plaguicidas, pesticidas y fertilizantes representen una mayor amenaza para el agua subterránea.
- Base principal para otros estudios hidrogeológicos de mayor amplitud y detalle.
- Como instrumento de estudio para determinar adecuada ubicación de posibles fuentes de contaminación en áreas vulnerables

## Conclusiones

En la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica obtenida, a través del método DRASTIC, se edificaron cinco índices: insignificante, baja, moderada, alta y muy alta, el índice de mayor y menor valor numérico DRASTIC fue 78 y 191, respectivamente.

El índice que predomina en el acuífero del valle de Achuapa es el de baja vulnerabilidad, con un área de 8.55 km<sup>2</sup>, correspondiente al 35 %. El índice de moderada vulnerabilidad es de 6.59 km<sup>2</sup>, equivalente a 26.8 %. Los índices de extrema y alta vulnerabilidad corresponden 6.80 km<sup>2</sup> y 2.56 km<sup>2</sup> respectivamente, equivalente al 27.7 % y 10.4 % de la superficie del acuífero.

Debido a que los índices DRASTIC de moderada, alta y muy alta vulnerabilidad cubren el 65 % del área total del acuífero del valle de Achuapa, es necesario establecer medidas de protección del recurso hídrico, ya que esta condición representa una amenaza a la calidad natural del agua subterránea.

## Agradecimientos

Servicio de Intercambio Académico (DAAD), por brindarme la oportunidad de seguir creciendo en mi vida profesional y todo el personal docente y administrativo de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS).

## Referencias

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution*

- Potential Using Hydrogeologic Settings.*  
Dublin, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Fenzel, N. (1989). En *Nicaragua; Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología* (págs. 5, 15, 16, 30, 54). Belém: PIDL.
- Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants". The Netherlands.
- INETER. (1972). *Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (PHCA)*.
- INETER. (2004). En *Estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región Central de Nicaragua* (págs. 26, 47). Managua, Nicaragua: COSUDE.
- INETER. (2012). *Boletín hidrogeológico*. Managua.
- MAG, MARENA, UNA, INAFOR, & INETER. (2015). *Atlas de Mapas Nacionales de Suelos, Uso Potencial, Coberturas y Usos de la Tierra y Conflictos de Uso de la Republica de Nicaragua*. Managua.
- PNRH. (2017). Diagnóstico Inicial de los Recursos Hídricos y Desarrollo de Líneas Estratégicas, Anexo 2 Componente Aguas Subterráneas. Nicaragua: WORLD BANK GROUP.
- Ramos, A. (2012). *Vulnerabilidad Hidrogeológica de la Cuenca El Sauce Usando el Método DRASTIC*. El Sauce, León: Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- Ramos, A. (2019). *Caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica y propuesta de plan de protección en función de la contaminación del agua subterránea, en el acuífero del valle de Achuapa, Nicaragua*.
- Traña, M., Vázquez, B., & Bobadilla, O. (2002). Estudio Geofísico para el Proyecto Mapificación Hidrogeológica de la Región Central—Hoja Estelí. Managua.