



# **SITIOS CON ELEVADAS CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN EL ACUÍFERO MORELIA – QUERÉNDARO Y SU RELACIÓN CON LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA (PGR) Y SITIOS VULNERABLES DE CONTAMINACIÓN (DRASTIC)**

**María del Mar Navarro-Farfán<sup>1</sup>, Sonia Tatiana Sánchez-Quispe<sup>2</sup>, Marco Antonio Martínez-Cinco<sup>3</sup>, Liliana GarcíaRomero<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

<sup>1</sup>*maria.navarro@umich.mx*

## **RESUMEN**

En México, cerca de un cuarto de la población tiene problemas relacionados con el agua, los cuales pueden referirse a la cantidad o calidad del recurso; así mismo, el 39% de la población se abastece de agua subterránea, es por ello que se vuelve necesario entender el comportamiento de los acuíferos para otorgar a la población el recurso de forma adecuada.

Los elementos potencialmente tóxicos son aquellos que tienden a tener un grado de peligrosidad en el organismo si es que se consumen habitualmente, tal el caso del arsénico (As). Por otra parte, se tiene que el comportamiento de las recargas en el acuífero no es homogénea y, es por ello que se propone, el uso de dos metodologías que permiten relacionar las recargas al acuífero de acuerdo a zonas de mayor percolación por medio de mapas de potenciales zonas de recarga (PGR) y zonas vulnerables a la contaminación (mapa DRASTIC).

Es importante relacionar las potencial recarga subterránea con sitios de contaminación para posteriormente validarlos con mapas tipo bubble de contaminantes y así, predecir el posible comportamiento y génesis del contaminante a lo largo del acuífero Morelia- Queréndaro.

### **Palabras clave**

Recarga al acuífero, Contaminación, Flujos subterráneos.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La escasez de agua afecta es un problema global. Cerca de 1,200 millones de personas, casi una quinta parte de la población mundial vive en áreas de escasez física de agua. Alrededor de 1,600 millones, un cuarto de la población mundial, se enfrentan a situaciones de escasez económica de agua, donde los países carecen de la infraestructura necesaria para transportar el agua desde ríos y acuíferos [1].

En México, el 39% del volumen de agua para uso consuntivo proviene del agua subterránea [2], ante ello, existe la necesidad de conocer la calidad del agua que se proporciona a los

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

usuarios, así como la disponibilidad hídrica (tanto superficial como subterránea) en distintas zonas de estudio a lo largo del país.

La mayoría de las sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en estado iónico. Algunos iones están presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos. Estos iones mayoritarios son los cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio) y los aniones (bicarbonato, sulfato y cloruro). Es frecuente que el anión nitrato se considere dentro del grupo de iones mayoritarios, aun cuando su concentración es pequeña si los efectos antrópicos son poco importantes.

En general, los metales en aguas subterráneas son más móviles en ambientes ácidos o de bajo pH, bajo la forma de iones metálicos con carga. Sin embargo, existen condiciones diferentes para los distintos metales bajo las cuales éstos se presentan en solución o precipitan, lo que condiciona evidentemente la posibilidad de ser transportados en los sistemas de flujo subterráneo. De hecho, a pH muy básicos algunos metales (Se, V, As, Cr) pueden volver a movilizarse bajo la forma de aniones solubles complejos, formando hidroxicomplejos [3].

Existen efectos adversos en la salud conocidos desde hace mucho tiempo, debido a la exposición de metales que, a pesar de los numerosos esfuerzos por disminuir la contaminación ambiental, la exposición a los mismos continúa, y las concentraciones continúan incrementándose en algunos lugares del mundo y en particular en ciudades en vías de desarrollo [4].

## **1.1 ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio coincide con la cuenca del Lago de Cuitzeo, la cual se encuentra en el límite entre los estados de Michoacán de Ocampo y Guanajuato. Dentro de la cuenca, se localiza la localidad de Morelia y, por ende, el parte del municipio de Morelia; además, como se muestra en la Figura 1, dentro de la zona de estudio se localizan 3 cuerpos de agua: Lago de Cuitzeo al norte, Presa de Cointzio al sur y Presa de Queréndaro al este.

La cuenca del Lago de Cuitzeo pertenece a la Región Hidrológica Administrativa Lerma Santiago Pacífico; a la Región Hidrológica Lerma Santiago y a la Subregión Hidrológica Alto Lerma; se tiene un clima templado, subhúmedo, temperatura media anual de 12° C a 18° C y una precipitación de 40 mm en el mes más seco.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

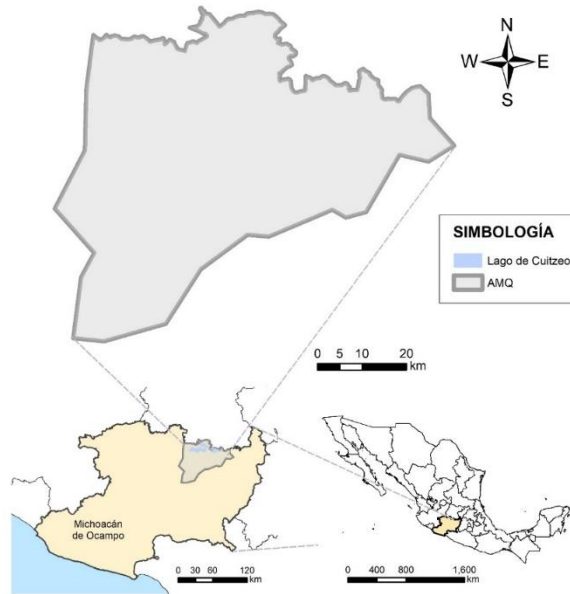


Figura 1. Localización de la zona de estudio: Acuífero Morelia-Queréndaro.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 POTENCIALES ZONAS DE RECARGA

Para la realización del mapa de zonas con potencial recarga al acuífero (PGR), se utiliza la calculadora de mapas (en formato ráster) para poder establecer zonas con mayor capacidad de infiltración, esto se realiza con el apoyo de mapas temáticos que describen las diferentes capacidades de recarga con las cuales cuenta cada una [2].

La clasificación que se le dará a cada clase dependerá de sus características para una posible zona de recarga en cada capa temática, algunos autores usan principalmente 5 clasificaciones [3], sin embargo, se decide utilizar una escala de 1 – 7, considerando que 1 es la capacidad mínima de recarga y 7 es la capacidad máxima.

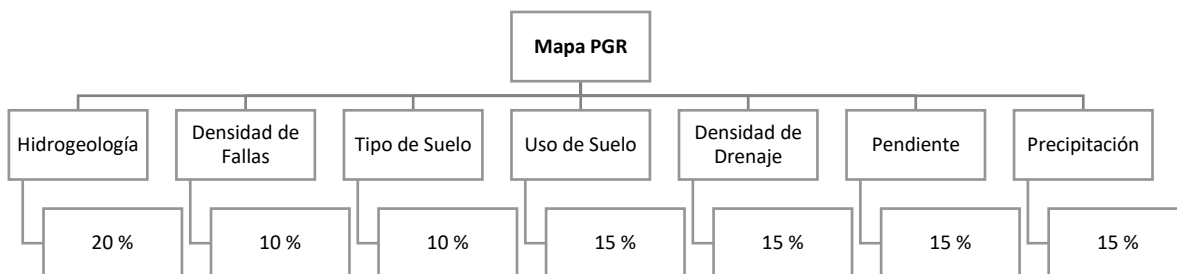


Figura 2. Capas temáticas utilizadas e influencia para la realización del mapa PGR.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Los mapas temáticos se realizan con una distribución espacial que depende de las características de cada capa temática, los cuales se presentan en la Figura 2, junto con la influencia que se le otorga a cada variable. La variabilidad del factor de influencia se obtiene de acuerdo con la recurrencia de la variable en la zona de estudio.

**2.2 MAPA DRASTIC**

DRASTIC es un método establecido para la generación de un mapa de vulnerabilidad al acuífero por contaminación a partir de capas temáticas [4, 5], en las que se presenta la capacidad de ingreso del contaminante, dicho método se realiza por medio de la manipulación de mapas espacialmente distribuidos:

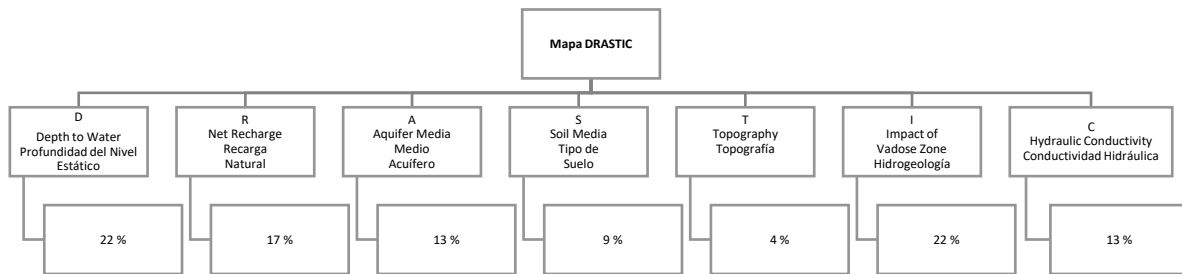


Figura 3. Capas temáticas utilizadas e influencia para la realización del mapa DRASTIC.

Al igual que en el mapa PGR, se tiene que cada una de las capas temáticas está ponderada por un porcentaje (Figura 3) para lograr tener el mapa con el impacto real de la contaminación. De forma similar, se tiene una reclasificación por 7 valores, donde se tiene que el valor 1 corresponde a sitios con poca capacidad de contaminación y el valor de 7 corresponde a una alta probabilidad de contaminación.

**2.3 MAPA PGR + DRASTIC CON INTERPOLACIÓN DE ARSÉNICO, NITRITOS Y NITRATOS**

El mapa PGR + DRASTIC se utiliza como base para superponer información de concentraciones de arsénico (As) con indicadores graduales de tipo bubble, de tal forma que sea posible identificar las relaciones que tiene el medio acuífero con las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos, el mapa considera la unión de ambos mapas, ponderándolos con un factor del 50%.

**3. RESULTADOS**

**3.1 MAPA POTENCIALES ZONAS DE RECARGA (PGR)**

El mapa PGR requiere mapas distribuidos los parámetros que interfieren en la infiltración el agua al medio poroso, con ello, se otorga un porcentaje de influencia, para lograr ponderarlo:

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

**Hidrogeología.** Se tienen permeabilidades medias a altas según la información existente a nivel nacional.

**Densidad de fallas.** La densidad de fallas va desde muy baja, lo cual se obtiene con una relación entre longitud de falla en un área determinada, la cual se reclasifica de 1 a 6, siendo 6 la densidad más alta de fallas.

**Tipo de suelo.** Se tiene un suelo fino, medio y aluvial; de los cuales el aluvial es el que permite mayor recarga y se encuentra en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo.

**Uso de suelo.** Con respecto al uso de suelo, se tiene que el uso agrícola es el que tiene mayor influencia en la zona de estudio, además las zonas de mayor recarga, considerando el bosque, se localizan en la periferia de la zona de estudio.

**Densidad de drenaje.** La densidad de drenaje se presenta de acuerdo con la red de drenaje presente en la zona, teniendo una mayor densidad en la periferia de la zona de estudio, cerca de los cerros que limitan el área.

**Pendiente.** Los sitios con pendiente más llana se localizan en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo y, las pendientes más escarpadas cerca de los cerros que limitan el acuífero en sí.

**Precipitación.** Los valores de precipitación se tienen desde 654 mm/año (zona norte) hasta los 1336 mm/año (zona sur).

Se tiene entonces que, los valores reclasificados y ponderados según la información mostrada en la Figura 2, son utilizados para crear el mapa PGR, mostrado en la Figura 4. En el mapa PGR se observa que los sitios con mayor capacidad de recarga se localizan cerca del Lago de Cuitzeo y en la falda de los cerros que generan el parteaguas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Se observa que los sitios con menor capacidad de recarga se localizan en las inmediaciones del municipio de Morelia, donde se tiene un uso y tipo de suelo menos favorables para la infiltración.

### 3.2 MAPA DRASTIC

Con respecto al mapa DRASTIC, se presenta la información que se utilizó con cada uno de los mapas:

**D → Nivel estático.** Los niveles más someros de los niveles estáticos se localizan en la periferia del Lago de Cuitzeo, así como en la zona sur de la zona metropolitana de Morelia.

**R → Recarga superficial media.** Dependiendo de la cuenca en la cual se localiza, se puede tener una mayor o menor recarga, la zona aledaña al lago de Cuitzeo es la que presenta los volúmenes de infiltración más bajos.

**A → Medio acuífero.** Con respecto al medio acuífero, la zona de estudio tiene que en la zona de estudio predominan los suelos lacustres (cerca del Lago de Cuitzeo), así como la toba, riolita, andesita y basaltos.

**S → Tipo de suelo.** Con respecto al tipo de suelo, se tiene suelo fino, medio y aluvial, siendo el medio el más propenso a permitir recarga y por tanto, paso de la contaminación.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

**T → Topografía.** La topografía tiene valores de terrenos escarpados en las faldas de los cerros que limitan el área de estudio y, los sitios más planos o llanos se localizan de nuevo cerca de la zona del Lago de Cuitzeo.

**I → Medio geológico.** También se conoce que la permeabilidad en el sitio es va desde una permeabilidad media a alta según la información existente en las bases de datos.

**C → Conductividad Hidráulica.** Los valores de conductividad hidráulica son relativamente bajos, oscilando de acuerdo a la geología con valores entre 0.164 – 3.3 m/día.

Para generar el mapa DRASTIC, se ponderan entonces los mapas explicados anteriormente de acuerdo con la información mostrada en la Figura 3. El mapa DRASTIC se muestra en la Figura 5 y, se obtiene que los valores con mayor capacidad de contaminación se encuentran en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo, así como en la parte baja de los cerros que conforman el parteaguas de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

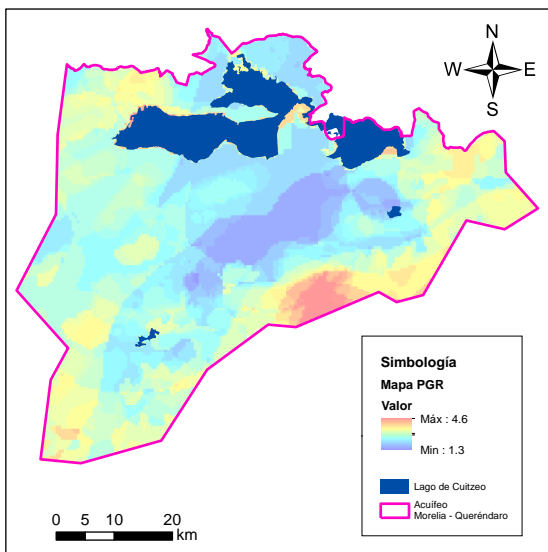


Figura 4. Mapa de potenciales zonas de recarga (PGR) en el acuífero Morelia – Queréndaro.

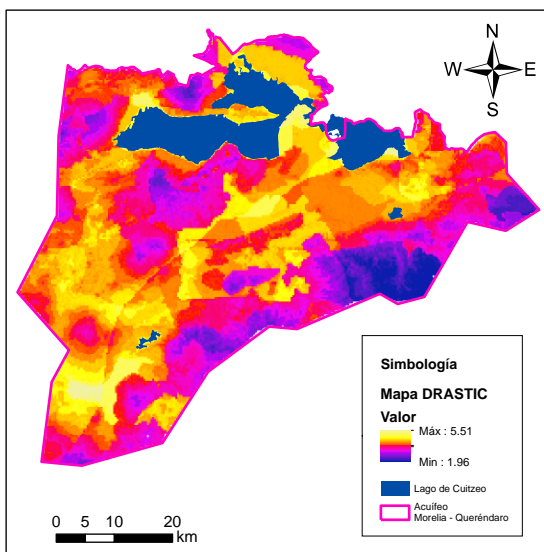


Figura 5. Mapa DRASTIC en el acuífero Morelia – Queréndaro.

**3.3 MAPA DRASTIC + PGR CON ARSÉNICO.**

La principal diferencia con el mapa PGR es que en el caso del mapa DRASTIC, la zona que corresponde al municipio de Morelia si tiene capacidad de contaminación, por lo que para ello se propone la creación del mapa PGR – DRASTIC (Figura 6), en el cual, se considera la unión de ambos mapas, ponderándolos con un factor del 50% y, considerando entonces que se tiene que un nuevo mapa reclasificado con un rango de 1 – 7, siendo 1 el valor más favorable donde no se presenta contaminación ni recarga y, el 7 el valor más crítico, con mayor posibilidad de recarga y por ende, de contaminación.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

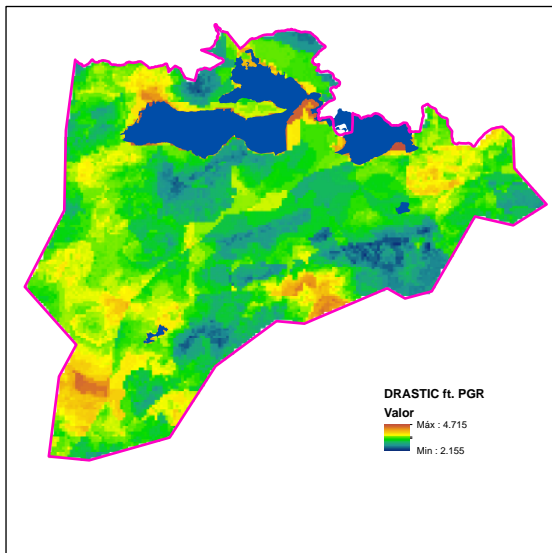


Figura 6. Mapa de PGR + DRASTIC en el acuífero Morelia – Queréndaro.

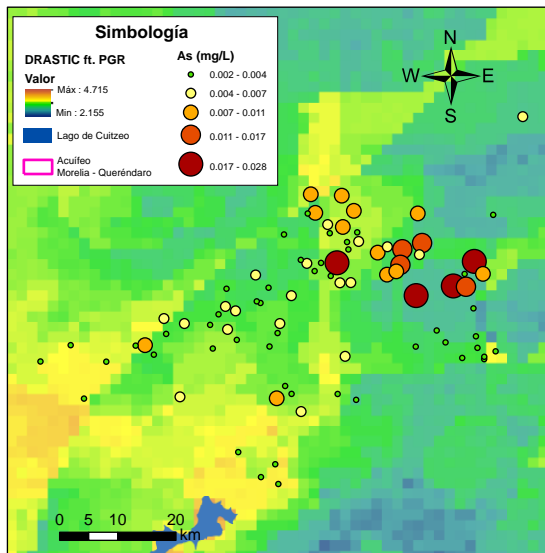


Figura 7. Mapa de concentraciones de Arsénico en el acuífero Morelia – Queréndaro y su relación con el mapa PGR – DRASTIC.

A partir del mapa PGR + DRASTIC, se posicionaron los puntos con mediciones de Arsénico, ello para poder observar si los sitios con mayor capacidad de contaminación coinciden con las altas concentraciones de Arsénico en las inmediaciones del municipio de Morelia (Figura 7), al encontrarse en sitios con baja posibilidad de recarga y contaminación, se puede suponer que las elevadas concentraciones no provienen de fuentes superficiales y su presencia puede ser natural o por transporte en el medio subterráneo.

**4. CONCLUSIONES**

Con la metodología descrita anteriormente se pueden establecer conclusiones preliminares que consideren si los elementos tienen una explicación antropogénica o natural de acuerdo con la geología en la zona de estudio. Considerando lo anterior, se tiene que la presencia de Arsénico se presume de origen natural debido a que los niveles del mismo contaminante no tienen relación con las zonas de mayor recarga y, de mayor contaminación. Con respecto a las direcciones de flujo, se observa que la tendencia del aumento sí tiene relación con la dirección sur – norte.

Como primer punto, se tiene que es importante conocer las potenciales zonas de recarga para establecer una mejor gestión de políticas con respecto al recurso hídrico. El mapa DRASTIC muestra los sitios con mayor capacidad de contaminación, con lo cual se puede realizar un mapa de peligrosidad con respecto a las zonas industriales en la zona de estudio y así mismo, con los valores de los elementos potencialmente tóxicos. La presencia de los elementos potencialmente tóxicos en algunas de las zonas del acuífero se debe principalmente a la presencia del elemento de forma natural en la geología.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

No se tiene una relación clara entre las elevadas concentraciones de Arsénico y los sitios con mayor probabilidad de recarga y contaminación según los mapas PGR y DRASTIC, por lo que se puede suponer que el Arsénico presente proviene de fuentes naturales.

**Nomenclatura**

PGR	Potenciales Zonas de Recarga
DRASTIC	Sitios Vulnerables de Contaminación
As	Arsénico

**REFERENCIAS**

- [1] PNDU, «Informe sobre Desarrollo Humano 2006: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua.,» Política Nacional de Desarrollo Urbano , El Salvador , 2006.
- [2] SEMARNAT, «Estadísticas del Agua en México,» Comisión Nacional del Agua , México, 2018.
- [3] R. Oyarzún, Transporte de contaminantes en aguas subterráneas, Chile: Temas Ambientales, 2007.
- [4] C. Nava Ruiz y M. Méndez Armenta, «Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio),» Archivo Neurociencias, vol. 16, n° 3, pp. 140-147, 2011.
- [5] K. Ramadhani Mussa y I. Chikira Mjemah, «Open-Source Software Application for Hydrogeological Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones in the Singida SemiArid, Fractured Aquifer,Central Tanzania,» Hydrology, vol. 7, n° 28, 2020.
- [6] O. D. M. Silva, «Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua,» CATIE, 2006.
- [7] M. Awawdeh, M. Obeidat y G. Zaiter, «Groundwater vulnerability assessment in the vicinity of Ramtha wastewater treatment plant, North Jordan,» Applied Water Science, 2014.
- [8] L. Aller, T. Bennett, J. H. Lehr y G. Hackett, «DRASTIC: a Standarized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings,» National Water Well Association, Ohio, 1987.