

## LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL NATURAL DE RECARGA HÍDRICA: ENSAYO DE ENFOQUE MULTIESCALAR EN EL ACUÍFERO CUAUHTÉMOC.

Ángel Adrián SÁENZ-LÓPEZ. <sup>a</sup>, Luis Carlos BRAVO-PEÑA. <sup>b</sup>, María Elena TORRES-OLAVE. <sup>b</sup>, Luis Carlos ALATORRE-CEJUDO. <sup>b</sup>

<sup>a</sup>UACJ-División Cuauhtémoc, Km. 3.5 Carretera Anáhuac, email: aadrn77@gmail.com

<sup>b</sup>UACJ-División Cuauhtémoc, Profesor Investigador de Tiempo Completo, Lic. en Geoinformática.

### RESUMEN

El abatimiento de acuíferos en Chihuahua, asociado con usos no sustentables del agua subterránea, plantea la necesidad de implementar acciones para la recarga de acuíferos. En este trabajo se muestra el resultado de aplicar una metodología de evaluación multicriterio a través de SIG's, para la identificación de áreas de recarga al acuífero en una sub-cuenca que pertenece a la cuenca de la Laguna Bustillos. Se aplicó el Modelo de Matus (2009) que pondera, en una sumatoria lineal, el valor de factores relevantes del medio físico que intervienen en la recarga (geología, edafología, pendiente, uso del suelo, y densidad de la vegetación); identificándose áreas que presentan alto potencial de recarga. Estas áreas fueron evaluadas en una segunda fase mediante indicadores morfométricos vinculados con la red superficial de drenaje. Los resultados muestran la complementariedad de los métodos de evaluación multicriterio, y parámetros morfométricos para la definición y rehabilitación de zonas de recarga.

**Palabras clave:** *acuífero, evaluación multicriterio, zona de recarga.*

### ABSTRACT

The depression of aquifers in Chihuahua, associated with unsustainable uses of groundwater, propose the need to implement actions to aquifers recharge. This document shows the results of apply a multi-criteria evaluation methodology, in a geographic information systems environment for identifying areas of recharge to the aquifer, in a sub drainage basin of Laguna Bustillos. In the evaluation, the Model of Matus (2009) was applied which weighs, on a linear sum, physical factors involved in recharge (geology, edaphology, slope, land use, and vegetation density); to identify areas with high potential for recharge. These areas were evaluated using morphometric indicators, linked with the surface drainage network. The results show the complementarity of multi-criteria evaluation methods, and morphometric parameters for defining and rehabilitate areas of recharge.

**Key words:** *Groundwater, multi-criteria evaluation, area of recharge*

### 1 INTRODUCCIÓN

La recarga es el proceso de incorporación del recurso hídrico, desde el sustrato geológico hasta los acuíferos. El área o donde ocurre la recarga se llama zona de recarga. (INAB, 2003).

La región delimitada por la cuenca de bustillos, cuenta con una fuerte sobre explotación del acuífero. Este fenómeno reviste mucha importancia, porque el acuífero abastece a la

producción agrícola y frutícola, así como a la población en general (Díaz *et al.*, 2014)

En las escorrentías superficiales, los productores agrícolas generan reservorios artificiales para el almacenamiento de agua (Bravo *et al.*, 2014)

Resolver la situación anterior, demanda la identificación y protección ambiental de las áreas de recarga al acuífero que son más críticas. Esto puede atenderse mediante la implementación de técnicas de análisis territorial, sustentadas en métodos de evaluación multicriterio (Gómez y Barredo, 2005). Este fue el objetivo de este trabajo.

## 2 MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1 Área de estudio:

El área de estudio (Fig. 1) se localiza en una sub-cuenca de la cuenca hidrológica de la Laguna de Bustillos, la cual se encuentra al sureste de esta, ubicada en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Esta sub-cuenca tiene una altitud que varía entre los 2108 en las zonas más bajas, y los 2697 metros sobre el nivel del mar en las zonas de pie de monte y tiene un área de 221.27 Km<sup>2</sup>.

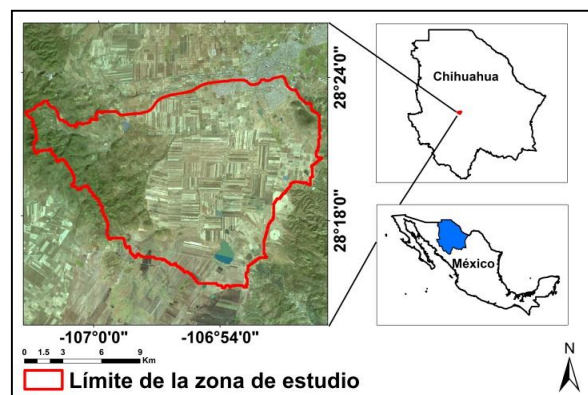


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

### 2.2 Insumos:

Se contó con una imagen SPOT para el año 2012, además de una serie de imágenes LANDSAT 8 del año 2014 (path 33, row 40). También se contó con un Modelo Digital de Elevaciones (MDT USGS), y escorrentías superficiales obtenidas a partir de in SIG. Además se utilizaron cartografías tales como: uso de suelo, geología (INEGI, 2005) y cobertura vegetal obtenidas de Bravo *et al.*, 2014.

### 2.3 Procedimientos:

Esta evaluación se desarrolló bajo enfoque multiescalar, con aproximaciones sucesivas que parten de lo general. Se utilizaron los softwares ArcMap™ 10.2 e Idrisi Selva™ para implementar en una plataforma de SIG's, los siguientes

procedimientos: **Escala macro:** En esta escala se determinó el área con más potencial de implementarse como zona protegida de recarga donde se definieron criterios para descartar áreas donde el potencial de recarga es muy bajo. Estas áreas no serían analizadas en fases posteriores del trabajo. Los criterios fueron:

- La distribución de las zonas de explotación y no explotación, que se extrajeron de la cartografía publicada por Alatorre *et al.*, (2014).
- La distribución geográfica de las unidades hidrológicas del suelo, dependiendo de sus condiciones de permeabilidad, según Gómez y Soriano (2013).
- En las zonas bajas se desarrolla una intensa actividad agrícola y se localizan la mayoría de los asentamientos humanos que contribuyen en gran medida a un déficit de infiltración. Con base a los criterios anteriores, se identificaron las áreas a analizar en este estudio, en las fases meso y micro. El área seleccionada en la fase anterior, fue sujeta a la aplicación del modelo de evaluación multicriterio propuesto por Matus (Matus, *et al.*, 2009). Este modelo incorpora datos e información correspondiente al medio físico, tales como geología, edafología, uso de suelo, vegetación, un índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) y pendiente.

### Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto:

Para determinar el potencial de recarga hídrica se emplearon como base las tablas de ponderación incluidas en el modelo, además de la siguiente ecuación (Matus, *et al.*, 2009):

$$ZR = [0.27(Pend) + 0.23(Ts) + 0.12(Tr) + 0.25(Cve) + 0.13(Us)]$$

Dónde:

**Pend:** Pendiente.

**TS:** Tipo de suelo.

**TR:** Tipo de roca.

**CVE:** Cobertura vegetal permanente.

**US:** Usos del suelo.

**Escala micro:** A partir de aplicar el modelo anterior e identificar las áreas con mayor potencial, se procedió a crear áreas más pequeñas que revelan con mayor exactitud la posibilidad de recarga. Para la creación de las sub-cuenclas se trazaron los parteaguas respectivos, considerando

tres atributos espaciales generados mediante el procesado del MDT en plataforma de SIG. Estos atributos fueron: a) el sombreado del MDT, b) los contornos altimétricos (curvas de nivel) generados cada 20 y cada 5 metros; c) la orientación de las pendientes. Con la Sobre el área delimitada a partir del proceso anterior, se generaron indicadores adicionales, que están relacionados con parámetros morfométricos de cuencas, en particular que describan la configuración de la red superficial de drenaje, que a su vez se relacionan con la permeabilidad del sustrato, con base en Pareta, (2012).

Los indicadores utilizados se determinan con las siguientes ecuaciones:

**Frecuencia de escorrentías.**

$$F_s = N_u / A$$

Dónde:

**Nu:** número total de segmentos de escorrentías.

**A:** unidad de área.

**Densidad de drenaje.**

$$D_d = \sum L_u / A$$

Dónde:

$\sum L_u$ : total longitudinal de escorrentías.

**A:** unidad de área.

**Numero de infiltración.**

$$I_f = F_s * D_d$$

Dónde:

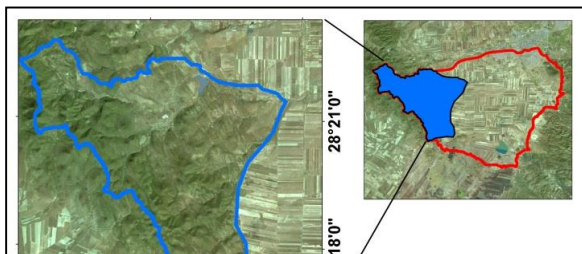
**Fs:** Frecuencia de escorrentías.

**Ds:** Densidad de drenaje.

Estos escurrimientos se obtuvieron de la cartografía publicada, pero también de trabajo de fotointerpretación, con base los procedimientos sugeridos por Paine y Kiser, (2012), para la identificación del patrón de drenaje.

**3 RESULTADOS**

**Fase macro:** Se delimitó la zona de recarga considerando las posibilidades efectivas de infiltración neta; es decir, las posibilidades de que la infiltración supere a la extracción. Esta zona se distingue a su vez por la presencia de suelos muy poco permeables, y la ocurrencia de actividades. A partir de la eliminación de zonas de explotación se redefinió el área, y paso de 221.27 km<sup>2</sup> a 58.75 km<sup>2</sup>, quedando un nuevo polígono para análisis. (Figura 2).



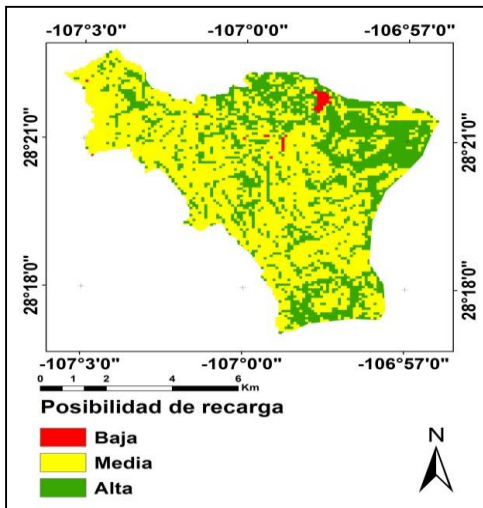
México.

**Figura 1.** Discriminación de la escala meso (polígono azul) de la escala macro (polígono rojo).

**Fase meso:** se realizó la ponderación de las capas geográficas para la evaluación bajo el modelo de Matus. Las capas evaluadas en esta fase fueron pendiente, uso del suelo, tipo de vegetación, geología y edafología, quedando ponderadas y reclasificadas de la siguiente manera en base a la posibilidad de recarga:

- a) pendiente: Muy alta (0-6.32%), Alta (6.32-13.71%), Moderada (13.71-22.67%), Baja (22.67-34.80%) y Muy baja (> 34.80%).
- b) Rocas: Muy alta (rocas del tipo Riolita-toba acida), y Alta (rocas del tipo conglomerado).
- c) Cobertura vegetal permanente: Muy alta (>80%), Alta (70-80%), Moderada (50-70%) Baja (30-50%), y Muy baja (< 30)
- d) Tipo de suelo: Muy alta (Natural), Alta (Agrícola de anuales pastizal), Moderada (Huertas de manzana), Baja (Urbano), y Muy baja (Cuerpo de agua).

Posterior a la obtención de estas capas se procedió a integrarlas al modelo propuesto, donde se obtuvieron valores para zonas potenciales de recarga hídrica que oscilan desde 1.71 a 3.49, los cuales se reclasificaron en 3 categorías (Figura7):



**Figura 2.** Zonas potenciales de recarga hídrica según el modelo de Matus 2009.

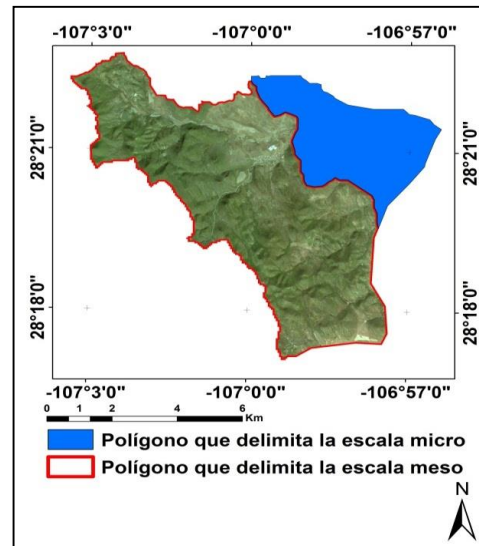
Se puede apreciar que las zonas con más aptitud de infiltración, se ubican en la parte noreste de la sub-cuenca, que en términos fisiográficos corresponden a la región más baja. Las superficies se indican en la tabla 1.

**Tabla 1.** Área de la posibilidad de recarga.

Posibilidad de recarga	Área
Baja	0.37 Km <sup>2</sup>
Media	38.84 Km <sup>2</sup>
Alta	19.69 Km <sup>2</sup>

A partir de la ponderación anterior se evidenciaron zonas a evaluar en la fase micro, mismas que tienen alto potencial de infiltración, pero que necesitan delimitarse con nuevos indicadores a mayor detalle, sustentados en este caso en la morfometría de la red de drenaje superficial.

**Fase micro:** se elaboraron 2 vectores para delimitar las microcuencas a evaluar en la fase micro y se eligió aquel que mostraba mayor correspondencia con la red superficial de drenaje al ser superpuesta con la imagen de satélite.

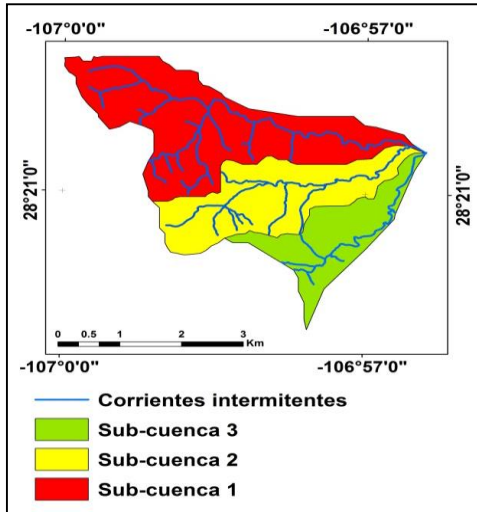


**Figura 3.** Discriminación de la escala micro de la escala meso

El vector elegido delimito la microcuenca a escala micro y las sub-cuencas. Cuyas áreas son: Sub-cuenca 1(6.83 Km<sup>2</sup>), Sub-cuenca 2(4.19 Km<sup>2</sup>), y Sub-cuenca 3(2.69 Km<sup>2</sup>). En las 3 sub-cuencas se realizaron estimaciones de los parámetros morfométricos para lograr determinar cuál de estas es la más apta para darle un manejo adecuado de conservación. Los parámetros aplicados por separado a cada microcuenca dieron los siguientes resultados (donde se demostró que la Sub-cuenca con mayor aptitud fue la numero 3):

**Tabla 2.** Indicadores morfométricos de cuencas.

	Sub-cuenca 1	Sub-cuenca 2	Sub-cuenca 3
Frecuencia de escorrentías (Fs)	3.66	2.14	2.23
Densidad de drenaje (Dd)	2.46	2.48	2.23
Número de infiltración (If)	9.003	5.30	4.97



**Figura 4.** Escala micro dividida en 3 sub-cuencas según las corrientes intermitentes.

Los indicadores sustentados en la densidad de la red de drenaje, reflejan de manera indirecta la permeabilidad del sustrato, pues entre menos Escorrentías superficiales, existe mayor infiltración hacia el acuífero. El agua no deja su huella disectando el relieve (Pareta y Pareta, 2012).

#### 4 DISCUSIÓN

Los resultados generados en este trabajo aportan elementos para resolver la problemática actual que enfrenta el acuífero de Bustillos. Este se encuentra severamente sobre-explotado, por lo que es importante implementar acciones de distinto tipo para mejorar su balance hídrico. Las dependencias gubernamentales y los actores sociales vinculados con esta problemática usualmente pretenden regular las extracciones (Bravo *et al.*, 2014b), pero también es prioritario rehabilitar las zonas de recarga.

Se aplicó y evaluó un modelo que tiene potencial de aplicación en toda la cuenca. Por el tipo de información requerida, este puede aplicarse con relativa facilidad en otras zonas de captación al acuífero, o bien en otras zonas de con problemáticas similares. Asimismo, su implementación genera bases objetivas para aplicar recursos públicos mediante programas gubernamentales que apoyan la conservación de cuencas, como el programa de pago por servicios hidrológicos (PSH) (Madrid, 2011).

Es importante destacar que se hace una aportación metodológica relevante, pues se incorporaron parámetros vinculados con la densidad de la red superficial de drenaje, que mejoran de manera directa la evaluación (Pareta y Pareta, 2012).

Es importante mencionar, que las áreas descartadas en la fase macro, también pueden habilitarse como áreas para rehabilitación del acuífero; pero bajo criterios y consideraciones distintas a las empleadas en el modelo de Matus (2009). En este caso tendría que pensarse, en la habilitación de obras para la infiltración artificial, como pozos de inyección (CONAGUA, 2003) pues las condiciones para la infiltración natural no son ideales.

La utilidad de utilizar modelos de evaluación multicriterio (EMC) que identifiquen las áreas óptimas desde un punto de vista territorial. Los EMC se sitúan en el ámbito de La Teoría de Soporte de Decisiones (Eastman, 2012) y facilitan en una plataforma de SIG's, la identificación de la solución óptima para problemas que requieren orientar geográficamente decisiones, actividades o alternativas de uso del suelo y conservación

#### 5 CONCLUSIONES.

En este trabajo se aplicó un modelo de evaluación territorial sustentado en métodos multicriterio para la identificación de zonas de recarga. Este modelo, provisto por Matus en 2009, mostró aplicabilidad en la zona. Por las capas de información utilizadas, el modelo tiene potencial de aplicación en otras zonas similares.

El modelo requiere de capas cartográficas que se han generado previamente por INEGI (Edafología, Geología), y por proveedores de imágenes de sensoria remota, como el MDT provisto por USGS. Cuando esta información no se ha generado por otros proveedores, es fácil generarse localmente por los analistas. Es el caso de la cartografía de la cubierta vegetal y los usos del suelo. Es importante considerar en relación a esto, que las capas de información cartográficas disponibles, a veces no tienen la calidad requerida, por lo que es necesario hacer los ajustes correspondientes a la escala de trabajo, mediante procesos de fotointerpretación.

Además de eso, en este trabajo se generó información adicional, vinculada con la densidad de red superficial de drenaje. Se probaron varios indicadores morfométricos, mostrando que pueden enriquecer los resultados iniciales.

Derivado de este proceso, se obtuvo que, el 33.42 % de la cuenca es alto, el 0.62 % es bajo, y el 65.92 % es medio para infiltración. Aunque estos porcentajes pueden variar si se restaura la cubierta vegetal. Los resultados obtenidos son útiles para la gestión y manejo sustentable del acuífero, pues proveen elementos para restaurar las áreas de recarga. Asimismo, para focalizar la aplicación de recursos gubernamentales en las áreas que pueden ser más críticas.

## 6 REFERENCIAS.

- Alatorre, L.; Díaz, R., Miramontes, S., Bravo, L., y E. Sánchez., (2014) "Spatial and Temporal Evolution of the Static Water Level of the Cuauhtémoc Aquifer during the Years 1973, 1991 and 2000: A Geographical Approach", *Journal of Geographic Information System*, número 6, Octubre 2014. pp. 572-584.
- Bravo, L; Alatorre, L. Cera., J; Sáenz, A. (2014a) "Menonitas, cultura y paisaje agrícola. Retos y oportunidades en el aprovechamiento del agua en Chihuahua", *Expo agro internacional Chihuahua 2014 y 7° foro del agua*, Chihuahua, Centro de exposiciones y convenciones de Chihuahua, 32 p.
- Bravo, L., Alatorre, L.; Torres, M., Rojas, H., y E. Sánchez., (2014b). *Prospección de indicadores de paisaje para evaluar el impacto hidrológico de los cambios de la cubierta vegetal y el uso del suelo en la región central de chihuahua*. Proyecto PROMEP. (Informe técnico final) Cuauhtémoc, Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. .
- Carbajal, A. y M. González, (2012) *Agua para la Salud. Pasado, presente y futuro, Propiedades y funciones biológicas del agua*. Madrid, Vaquero y Toxqui. pp. 33-45.
- CONAGUA (2003) "Norma oficial mexicana nom-014-conagua-2003, requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada" disponible en: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5105753&fecha=18/08/2009](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5105753&fecha=18/08/2009)
- CONAGUA (2009) "Acuerdo por el que se da a Díaz, R.; Bravo, L., Miramontes, S., Alatorre, L., y E. Sánchez., (2014) "Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, número 83, Mayo 2014. pp. 116-130.
- Eastman, J. (2012) *Idrisi Selva Manual, manual versión 17*. Clark University. pp. 126-165.
- Gómez, M. y J. Barredo, (2005) *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. 2ed, Madrid, España, RA-MA, 250 p.
- Gomez, V, Soriano, M. (2013) "Asignación de grupo hidrológico del suelo a partir de clasificaciones edáficas de base morfométrica", *6° Congreso Forestal Español*, Universidad Politécnica de Madrid., 11p.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía geológica*. Disponible en: [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/geolo/GEOI.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/geolo/GEOI.pdf)
- Instituto Nacional de Bosques, (2003) *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*, Guatemala, GT. 106 p.
- Jiménez, B. y J. Galizia, (2012) *Diagnostico del agua en las Américas*. México. 447p.
- Madrid, L., (2011) "Los pagos por servicios ambientales hidrológicos: Más allá de la conservación pasiva de los Bosques" *Investigación ambiental*, vol.3, número 2. pp. 52-58.
- Matus, O.; Faustino, J. y F. Jiménez, (2009) *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la sub-cuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Jucuapa, Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba, Costa Rica. 40 p.
- Ordoñez, J. (2011) *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico*. Lima, Peru. 44 p.
- Paine, D. y J. Kiser, (2012) *Aerial photography and image interpretation. Landforms and drainage patterns*. 3ed, Wiley & Sons, Inc. pp. 306-326
- Pareta, K. y U.Pareta, (2012) *Quantitative Morphometric Analysis of a Watershed. Based on digital terrain model and GIS. Basin Geometry*. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. pp. 39-49