

EFFECTOS HIDROAMBIENTALES DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA DEL ACUÍFERO DEL RÍO SINALOA

Hydro-environmental effects of the extraction of water from the Sinaloa River Aquifer

O Llanes-Cárdenes [✉](mailto:llanes@cipn.mx), M Norzagaray-Campos, Y Maya-Delgado, P Muñoz-Sevilla, FA Beltrán-Morales, B Murillo-Amador, E Troyo-Diéguéz

(OLLC)(YMD)(BMA)(ETD) Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). Mar Bermejo No. 195, Col. Playa Palo de Santa Rita Apdo. Postal 128; La Paz, B.C.S. 23090 México. etroyo04@cibnor.mx
(MNC) CIIDIR IPN- Sinaloa. Blvd. Juan de Dios Batíz Paredes No. 250. Guasave Sinaloa, C.P. 8101
(PMS) CIEMAD IPN. Calle 30 de Junio de 1520, Barrio la Laguna Ticomán C.P. 07340. Del. Gustavo A. Madero México. D.F.
(FABM) Universidad Autónoma de Baja California Sur, Departamento de Agronomía. La Paz, B.C.S.

Artículo recibido: 22 de octubre de 2009, aceptado: 06 de noviembre de 2011

RESUMEN. La llanura costera del acuífero del Río Sinaloa es vulnerable a la contaminación antropogénica y natural. Dicho impacto es exacerbado por la condición somera de las aguas subterráneas (0.1 a 9.2 m) y la elevada evapotranspiración ($834.32 \text{ mm año}^{-1}$), no balanceada por la precipitación promedio anual ($577.9 \text{ mm año}^{-1}$). Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: (1) determinar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación costera y (2) estimar la vulnerabilidad debida a las actividades antropogénicas, en función del aporte del flujo subterráneo. Se aplicó el método estandarizado DRASTIC a una escala 1:10 000 y se determinó la piezometría de la región mediante la información de 155 pozos. Se registraron la profundidad del nivel freático (D), la recarga neta (R), el material del acuífero (A), el tipo de suelo (S), la cota y pendiente del terreno (T), el impacto de la zona no saturada (I), la conductividad hidráulica (C) y la altura de la superficie piezométrica, y se calculó la carga hidráulica. Los resultados muestran una vulnerabilidad valorada de insignificante (Vi) a alta (Va), con un intervalo de variación de 88 a 166 unidades, amortiguada cuando la fuerza del flujo es alta y acentuada cuando la misma amengua. La costa y zona oeste fueron las más vulnerables, con 35 y 8 %, e índices de 140 a 166 y 139 a 157. Los altos índices DRASTIC se atribuyeron a la acumulación de solutos arrastrados hacia la costa por un flujo regional y otro intermedio, que atrapan a los mismos en pequeñas cuencas de escaso espesor.

Palabras clave: Vulnerabilidad, contaminación, acuífero, flujo, Índice DRASTIC.

ABSTRACT. The coastal plain of the Sinaloa River aquifer is vulnerable to anthropogenic and natural pollution. Impacts are increased by the shallowness of the groundwaters (0.1 to 9.2 m) and a high evapotranspiration ($834.32 \text{ mm year}^{-1}$) that is not balanced by the annual average rainfall ($577.9 \text{ mm year}^{-1}$). According to this scenario, the objectives of this study were: (1) to determine the vulnerability of the aquifer in face of coastal pollution and (2) to estimate the vulnerability as a function of groundwater flow, resulting from anthropogenic activities. The standardized DRASTIC INDEX method was applied at a 1:10 000 scale and the piezometry of the region was determined through the information recorded for 155 wells. The parameters recorded were the depth of the water table (D), the net recharge (R), the aquifer material media (A), the soil type (S), the topography and slope of the land (T), the impact on the unsaturated zone (I), the hydraulic conductivity (C) and the height of the piezometric surface, and the hydraulic head was calculated. The results indicate a vulnerability that varies from insignificant (Vi) to high (Va), with a variation range of 88 to 166 units, mitigated when the force of the aquifer flow is high and accentuated when it is reduced. The coast and the western area were the most vulnerable, with 35 and 8 %, and indices of 140 to 166 and 139 to 157. The high DRASTIC indices were attributed to the accumulation of solutes that are transported to the coast by a regional flow and an intermediate flow, which trap them in small basins of reduced thickness.

Key words: Vulnerability, pollution, aquifer, flow, DRASTIC Index.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la sensibilidad natural de un acuífero a la contaminación externa o vulnerabilidad hidrogeológica puede realizarse mediante el método DRASTIC, el cual se basa en procedimientos de extrapolación. Es utilizado por expertos en numerosos países para el desarrollo de planes estratégicos, frecuentemente con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos previstos a largo plazo para el manejo sostenible de los recursos naturales (Secunda et al. 1998). Aller et al. (1987) llevaron a cabo por primera vez un análisis DRASTIC en los EEUU a una escala 1:2 000 000; posteriormente la USEPA (1993) utilizó los resultados para analizar plaguicidas en pozos con aguas destinadas al consumo humano. Desde entonces, el método DRASTIC junto con GOD (Foster & Hirata 1988), AVI (Van & Sullivan 1992) y CINTACS (Civita et al. 1991), entre otros métodos desarrollados con la misma finalidad, se han convertido en herramientas útiles para la formulación de planes de protección de las aguas subterráneas. En su mayoría, tales métodos constituyen sistemas estandarizados; específicamente, DRASTIC utiliza escenarios hidrogeológicos con características y atributos de vulnerabilidad comunes a la contaminación, a diferencia de los demás, por ser de moderada complejidad al integrar solamente 7 factores. Es sencillo y aplicable con resultados confiables bajo las condiciones de numerosos acuíferos, como en EEUU (Anónimo 2003), Europa (Lobo-Ferreira & Oliveira 1997), Asia (Sharadgahah 2001) y Australia (Piscopo 2001). De acuerdo con los antecedentes expuestos, dicho método se aplicó al acuífero costero del Río Sinaloa, debido a que el mismo ha sido explotado durante años para satisfacer las múltiples actividades en la región, aunque propiciando la explotación excesiva de los recursos naturales (Velásquez et al. 2002). El escenario anterior ha propiciado procesos de erosión y pérdida de fertilidad del suelo, asimismo, la degradación de la calidad del agua y de la vida de los pobladores (Morales & Parada 2005). En este contexto, las elevadas tasas de evapotranspiración, con valores de 834.42 mm año⁻¹, que son mayores a los de la precipitación anual promedio (577.9 mm año⁻¹), han

favorecido procesos de desertificación y escasez de agua (Velásquez et al. 2002), toda vez que se presenta un desbalance hidrológico. Dicha condición, aunada a la condición somera de las aguas subterráneas (Norzagaray et al. 2004), torna vulnerable el acuífero a la contaminación.

Por lo anterior, en este trabajo se plantearon los siguientes objetivos: (1) determinar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación costera y (2) estimar la vulnerabilidad en función del aporte del flujo subterráneo regional e intermedio, debida a las actividades antropogénicas. Los resultados obtenidos en una de las regiones agrícolas más importantes de México son de amplia utilidad para el diagnóstico de la vulnerabilidad y para proveer oportunamente de planes de manejo apropiados ante el riesgo que enfrenta este acuífero, ocasionado y exacerbado por las aportaciones contaminantes provocadas por la agricultura, ganadería y desarrollo urbano, entre otras actividades.

MATERIALES Y MÉTODOS

La técnica DRASTIC fue aplicada en una superficie de 4500 km² de la llanura costera del Pacífico Mexicano, dentro de la provincia fisiográfica de la Cuenca del Río Sinaloa, la cual abarca una extensión de 8179 km² (Figura 1). La cuenca pertenece a la Región RH10-SINALOA (INEGI 2005); colinda al norte con la Sierra Madre Occidental y al sur con el Golfo de California. En esta zona, el afluente principal es el Río Sinaloa y el acuífero principal es el denominado acuífero Sinaloa. Existen tres afluentes concurrentes de menor caudal, pero relevantes para la hidrología local: los arroyos Cabrera (con caudal de 20 a 25 m³ s⁻¹), Ocoroni (25 a 35 m³ s⁻¹) y San Rafael (15.2 m³ s⁻¹). Dichos cauces aportan al Río Sinaloa un caudal promedio de 150 m³ s⁻¹ destinado al Golfo de California. En infraestructura, el canal del Valle del Fuerte se construyó por los agricultores a finales de la década de los 40's, con el objetivo de satisfacer la agricultura regional del Valle de Guasave (Humphries 1986). Dicho canal conduce en promedio un caudal de 120 m³ s⁻¹ y disecta los sedimentos del acuífero hasta una profundidad de 40 m. El índice DRASTIC (ID)

fue calculado mediante la sumatoria del producto existente entre el peso relativo (P) del impacto de la profundidad al nivel freático (D), la recarga neta (R), el material del acuífero (A), el tipo de suelo (S), la pendiente del terreno (T), el impacto en la zona no saturada (I) y la conductividad hidráulica (C) (Pérez & Pacheco 2004; Canter 1997):

$$ID = DpDi + RpRi + ApAi + SpSi + TpTi + Ipli + CpCi \quad (1)$$

Donde:

DpDi, RpRi, ApAi, SpSi, TpTi, Ipli y CpCi fueron los productos del peso relativo por el impacto ocasionado en el acuífero a causa de los factores D, R, A, S, T, I, C. El modelo se aplicó considerando que Civita *et al.* (1991) caracterizaron a DRASTIC como un modelo con un sistema adecuado de conteo de puntos paramétricos. Dentro de la disponibilidad de programas como GRID: ARC/INFO, SURFER y otros SIG, en los cuales se procesan datos como herramienta espacial, seleccionamos el programa SURFER 8.0 para elaborar los mapas de cada factor a una escala 1:10 000.

Con la finalidad de obtener D y T en campo con un GPS portátil GARMIN Olathe de 12 canales, 155 pozos fueron elegidos al azar, los cuales fueron localizados y posicionados en coordenadas UTM. Para determinar D con una "sonda de nivel", se realizó una piezometría instantánea de 3 días. La cota de la superficie del terreno (h) para obtener T se determinó mediante la técnica de "arrastre" con un teodolito electrónico APEX modelo ET-5 de desviación estándar (*s*) 0.05. En virtud de que la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería (TMISA 1978) reveló que la mayoría de pozos se sitúan en un acuífero libre, dicha información proporcionó la suficiente certeza metodológica para aplicar DRASTIC, ya que previamente se han cartografiado unidades hidrogeológicas con hidrodinámicas similares (Martínez *et al.* 1998).

Al considerar que en un acuífero libre la carga hidráulica (H) corresponde a la altura del nivel freático sobre un nivel de referencia, en este caso el nivel del mar, dicha información es de utilidad para

el cálculo de H en cada pozo, restando D a h (Serway & Jewett 2005). Para obtener el mapa piezométrico, las cargas se interpolaron en SURFER 8.0 bajo el sistema de Krieger (Emery 2007); a su vez, las direcciones del flujo subterráneo se definieron de manera perpendicular a las isopiezas (Hiscock 2005). Los factores A e I se determinaron usando 12 columnas estratigráficas en los pozos y la interpretación de 23 registros geofísicos eléctricos, 456 sondeos eléctricos Verticales y 751 mediciones electromagnéticas realizadas en el área de estudio por Norzagaray (2003). Los factores R, C y S se obtuvieron respectivamente de bibliografía existente en el área (Valle 2002; Norzagaray *et al.* 2004; Llanes-Cárdenas 2007). Una vez cartografiados los factores, se apilaron los mapas a P e I sobre la traza urbana de la región y se elaboró una malla de 150 celdas (15 x 10) correspondiente a 30 km² c/u (4 km de largo y 7.5 km de ancho) (Figura 1).

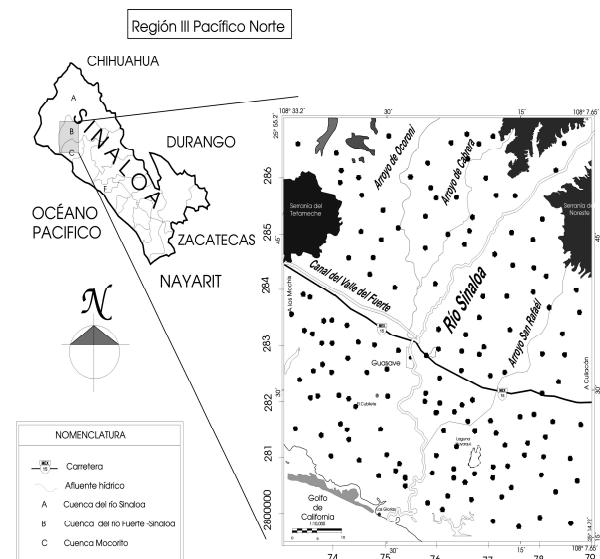


Figura 1. Localización de la Región hidrológica Pacífico Norte III y pozos en la llanura costera de la Cuenca del Río Sinaloa (Norzagaray *et al.* 2004).

Figure 1. Location of the North Pacific Hydrologic Region III and the wells on the coastal plain of the Sinaloa River Basin (Norzagaray, *et al.* 2004).

Según los criterios de Aller *et al.* (1987), a cada celda se asignó un valor de *p* considerando la contribución a la contaminación. Dicho valor fluctuó

de 5 a 1 y la ponderación de cada factor se elaboró bajo la siguiente propuesta: R, A, S y C, por no ser factibles a la modificación en un mediano o largo plazo, tuvieron un P de 3 unidades y representaron en el ID el 57.14%; por ser sensibles al cambio, D e I representaron en el ID un 28.57% y un P de 5 y 4 unidades, respectivamente. Por ser menos factibles a modificaciones, T representó en el ID un 14.28% y un P de 2 (Tabla 1). Para la interpretación del ID, y con la finalidad de definir la sensibilidad natural del acuífero a la carga de contaminantes o vulnerabilidad hidrogeológica, se aplicaron los siguientes intervalos:

$V < 100$: Vulnerabilidad insignificante (V_i), $V = 101$ a 119: Vulnerabilidad muy baja (V_{mb}), $V = 120$ a 139: Vulnerabilidad baja (V_b), $V = 140$ a 159: Vulnerabilidad moderada (V_m), $V = 160$ a 179: Vulnerabilidad alta (V_a), $V = 180$ a 199: Vulnerabilidad muy alta (V_{ma}), y $V > 200$: Vulnerabilidad extrema (V_e).

RESULTADOS

El promedio de la profundidad al nivel freático (Nf) fue de 3.59 m, con un intervalo de variación de 0.1 a 9.2 m; el 15.3 % de los pozos registraron un Nf menor a un msnm, el 24 % de 1.1 a 2 m, el 20 % de 2.1 a 4 m, el 28 % de 4.1 a 6 m y el 12.7 % restante mostraron Nf mayores a 6.1 m.

Con excepción de la protuberancia de la serranía del Tetameche, ubicada al noroeste de la región, donde se registró una altura promedio de 194.2 msnm, el promedio de la altura del terreno donde se ubicaban los pozos (h) alcanzó 34.7 msnm, con intervalo de variación de 4 a 85 msnm. Para el 14 % de los pozos, h fue menor a 10 msnm, para el 32 % varió de 11 a 20 msnm, en el 17.3 % varió de 20 a 40 msnm, para el 15.3 % h osciló de 40 a 60 msnm y para el 21.3 % h fue mayor a 60 msnm.

El promedio de la carga hidráulica (H) en el acuífero alcanzó 33.76 y fluctuó de 2.9 a 81.8 msnm; en el 16.7 % de los pozos H fue menor a 10 msnm, en el 14 % H osciló de 10 a 15 msnm, en el 22 % varió de 15 a 35 msnm, en el 34 % de 35 a 60 msnm y en el 13.3 % de los pozos H fue mayor a 60 msnm.

(Figura 2, A).

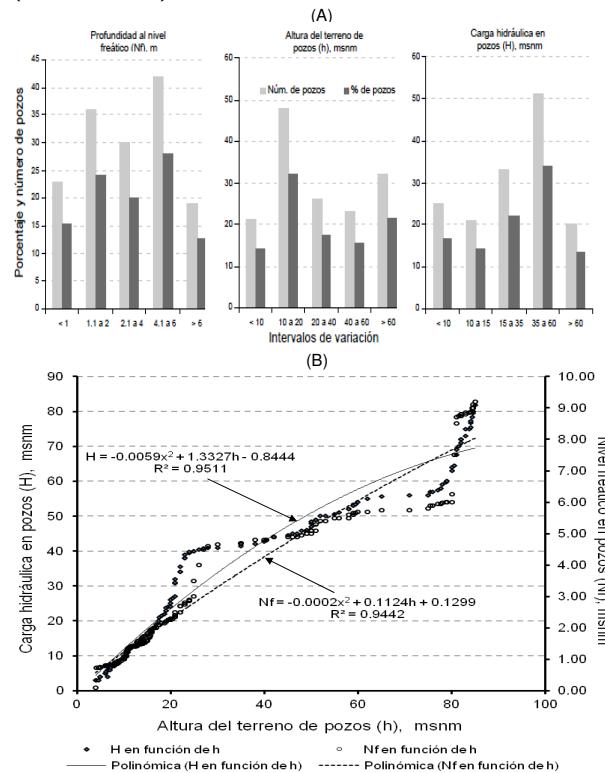


Figura 2. A. Intervalos de valores para el nivel freático (Nf), la altura del terreno (h) y la carga hidráulica (H), según el número y porcentaje de pozos. B. Tendencia y correlación numérica entre H y h , y entre Nf y h , con los respectivos modelos polinómicos (Nozagray, 2009).

Figure 2. A. Ranges of values for the water table depth (Nf), the altitude of the land (h) and the hydraulic head (H), according to the number and percentage of the wells. B. Numerical correlation and statistical tendency between H and h , and between Nf and h , with the corresponding polynomial models (Nozagray, 2009).

En la Figura 2, B se observa que la profundidad del Nf y H presentan variaciones que pueden interpretarse como una señal de agotamiento. Una vez realizado el análisis numérico de la información, se ubicó el comparativo entre las tendencias de las curvas de h y H ; al tratarse de un acuífero libre, muestran morfologías relativamente similares entre sí (Figura 2, B). Lo anterior se demostró mediante el resultado de ANOVA con un valor de $F = 1.2312$ al que le correspondió un valor de p de 0.99, con nivel de significación de 0.01; concluyendo que no existen diferencias significativas entre las medias de h y H . A su vez, el análisis grupal del ANOVA también sugirió

Tabla 1. Pesos relativos (P) e impacto de la contaminación (i) utilizados para definir el índice de vulnerabilidad DRASTIC en el acuífero del Río Sinaloa (adimensional).

Table 1. Relative weights (P) and impact of pollution (i) used to define the DRASTIC vulnerability index in the Sinaloa River aquifer (dimensionless).

Parámetros	Acuífero	
	Peso	Impacto
Profundidad al nivel freático (D)	5	1 a 10
Recarga neta (R)	3	1 a 10
Material del acuífero (A)	3	1 a 10
Suelo (S)	3	1 a 10
Topografía (T)	2	1 a 10
Impacto en la zona no saturada (I)	4	1 a 10
Conductividad hidráulica (C)	3	1 a 10

una diferencia no significativa según Tukey entre h y H de 0.0516, encontrándose de igual forma similitud estadística entre Nf y h con 99 %, entre Nf y H con 97 % y entre h y H con 99 % de confiabilidad.

La asociación numérica entre las curvas de H con h y Nf con h se rige respectivamente por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.951 y 0.944. Dicha aproximación se describe mediante una expresión cuadrática de segundo orden del tipo: ax^2+bx+c , donde a , b y c son constantes que definen la morfología. Las constantes de la profundidad de H y Nf fueron $a = -0.0059$ y -0.0022 , $b = 1.3327$ y 0.1124 , y $c = -0.8444$ y 0.1299 , respectivamente (Figura 2, B).

DISCUSIÓN

El mapa piezométrico (Figura 3, Sección A) muestra una piezometría paralela en la costa a profundidades de 5 msnm, por efecto de la captación de agua producto del flujo y los abatimientos. Por su parte, se identificaron dos direcciones del flujo según los principios de Tóth (2000): una principal o regional con orientación Noroeste-Suroeste y una intermedia también con dirección Noreste-Suroeste, desde los pies de monte de las serranías bajas de la cuenca. La corriente regional ingresa a la llanura en la superficie piezométrica con una profundidad de 65 msnm y de manera concurrente desde la superficie, y de 10 a 25 10 msnm. Dicha corriente se retroalimenta por las infiltraciones del Canal del Valle del Fuerte para continuar hacia su destino final, el Golfo

de California. Parte de los volúmenes regionales de la región hidrológica RH10-SINALOA corresponden a un estimado de 3473.73 Mm³ (M:millones) procedentes del estado de Chihuahua, reportados por Toutcha & Sosa-Soto (2005). La corriente intermedia procede desde la superficie piezométrica de 60 msnm del este de la región, alimentando al Arroyo San Rafael y al Río Sinaloa. Durante mucho tiempo los flujos regional e intermedio han impedido que la intrusión salina ingrese a la llanura (TMISA 1978; Manson 2007) y han amortiguado sus efectos anómalos. A pesar de esta protección natural del acuífero, la hidrodinámica costera actual se encuentra alterada y se refleja en las distintas direcciones que toma el flujo, además de la evidente presencia de un cono de abatimiento de 0.9 msnm (Figura 3, B).

La tendencia actual de la hidrodinámica manifiesta un desarrollo fuera de control, debido a los requerimientos de los volúmenes de agua comprometidos al sector productivo, de hasta 1131.03 Mm³ año⁻¹ (SEMARNAT 2006), muy por arriba de la recarga anual (510.46 Mm³ año⁻¹) identificada para la Subregión de Planeación Norte del Estado de Sinaloa (PEDUES 2007). De dicho volumen le corresponden al acuífero del Río Sinaloa entre 200 y 300 Mm³ año⁻¹.

Las demandas en su mayor parte se deben a la agricultura, lo cual ya es histórico. Lo anterior se registra desde 1967 con extracciones de 430 Mm³ año⁻¹ contra una recarga del flujo regional e intermedio de 230 Mm³ año⁻¹. A su vez, en 1968 las extracciones fueron de 130 Mm³ año⁻¹ contra una

recarga del flujo regional e intermedio de $200 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ y posteriormente, en 1977 las extracciones se incrementaron hasta $500 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ (TMISA 1978). Por el momento, el acuífero no presenta índices ID muy altos ni extremos, en tanto que registra un promedio de 133.60 unidades. Presenta un intervalo de variación de 88 a 166 unidades, los cuales corresponden a valores de vulnerabilidad desde insignificante (V_i) hasta alta (V_a). De las 150 celdas en las que se dividió la traza urbana, 8 registraron un ID insignificante (5.3 %), 24 muy bajo (16 %), 54 bajo (36 %), 56 moderado (37 %) y 8 con ID alto (5.3 %) (Tabla 2). La mencionada variación espacial de ID se ilustra en la Figura 4, en donde a los valores elevados de ID se muestran en sectores aislados de la costa y en la Serranía del Tetameche, en tanto que los valores no significativos se presentan cerca de las riveras de los arroyos de Ocoroni, de Cabrera y el Río Sinaloa, principalmente.

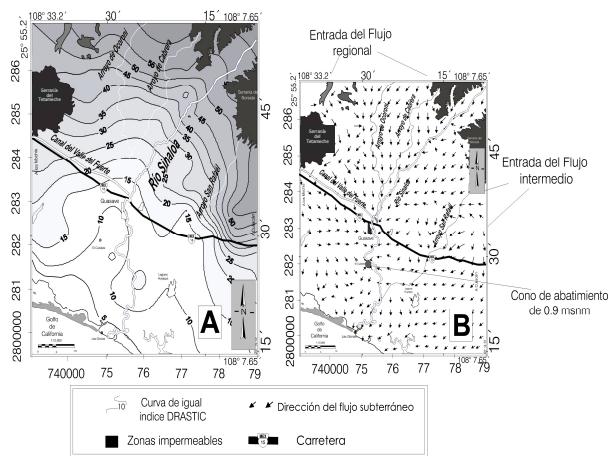


Figura 3. A. Mapa piezométrico (msnl). B. Líneas de flujo con las fuentes de abastecimiento y zonas de abatimiento del agua subterránea (B) (Llanes-Cárdenas, 2007).

Figure 3. A. Piezometric map (masl). B. Flow path with sources of water supply and areas of groundwater decrease (B) (Llanes-Cárdenas, 2007).

En la mayor parte de la porción costera en estudio, se determinó un ID entre 140 y 166 unidades, valores que corresponden a una vulnerabilidad V_m a V_a . Al comparar el ID y la dirección del flujo subterráneo de la Figura 4 (Sección B), se observa que el ID disminuye en lugares donde la fuerza del flujo aumenta debido a la hidrodinámica regional, lo cual

ocurre en las riveras de los arroyos de Ocoroni, de Cabrera, San Rafael y el Río Sinaloa, sucediendo lo contrario cuando la fuerza del mismo flujo amenga. Por tal razón, 65 % de los valores estimados como V_i , V_{mb} y V_b se ubican cercanos a los afluentes importantes (Figura 5), toda vez que son producto de la fuerza del flujo regional y de la unión de los flujos regional e intermedio cuando tienen las condiciones apropiadas para la atenuación de la carga contaminante.

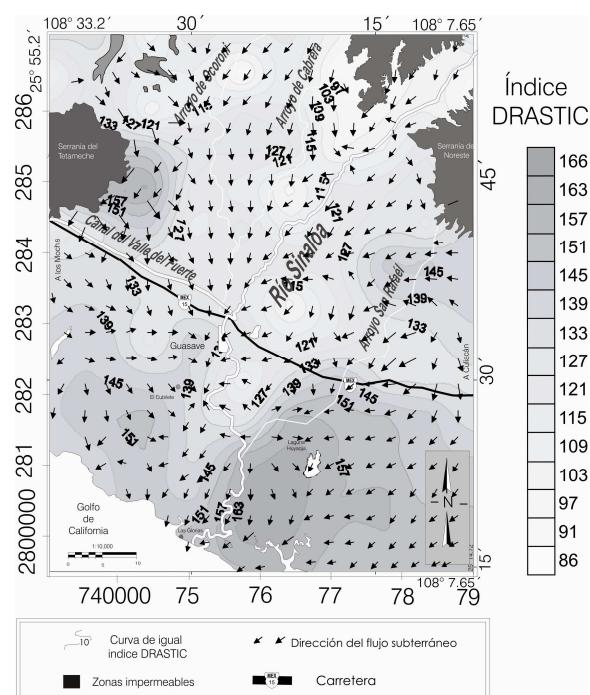


Figura 4. Variación del índice DRASTIC (adimensional) y dirección del flujo subterráneo (Norzagaray, 2009).

Figure 4. Variation of the DRASTIC Index (dimensionless) and direction of groundwater flow (Norzagaray, 2009).

Los flujos referidos, al relacionarse con la composición granulométrica, textura, porcentaje de materia orgánica y características geomorfológicas de la zona saturada, ocasionan que el ID disminuya. Tal amortiguación, indicativa de la protección natural del acuífero a la contaminación, no se presenta cerca del cauce del arroyo de Cabrera, lo que se atribuye a que la corriente intermedia no tiene la suficiente fuerza para atenuar los ID. Caso contrario sucede con la corriente regional, que al unirse con

la corriente intermedia entre las superficies piezométricas de 20 a 50 msnm, incrementa su fuerza y con ello participa en una sinergia hidrogeológica natural con las propiedades naturales del acuífero para su protección. Por debajo de los 20 msnm de la superficie piezométrica producto de las extracciones de agua, se manifiestan cambios en las direcciones del flujo, por lo que su fuerza se dispersa haciendo vulnerable la costa.

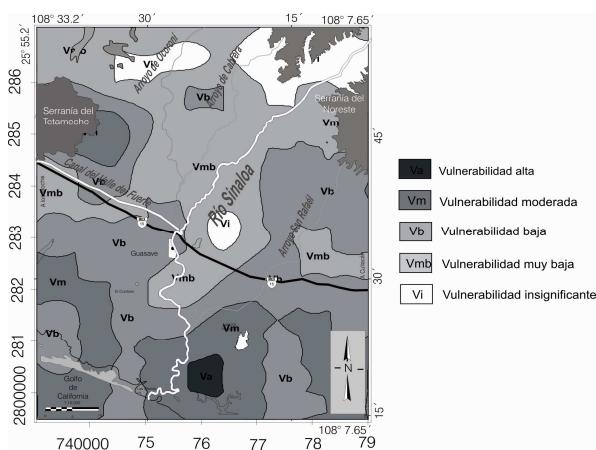


Figura 5. Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del Río Sinaloa (Llanes-Cárdenas, 2007) (adimensional).

Figure 5. Map of hydrogeologic vulnerability of the Sinaloa River aquifer (Llanes-Cárdenas, 2007) (dimensionless).

Por lo anterior, puede inferirse que el potencial de contaminación del acuífero es en función de la interacción entre el tipo, intensidad, disposición y duración de la carga contaminante, de la vulnerabilidad del acuífero, de las características físicas y químicas del acuífero y asimismo de la naturaleza del flujo regional e intermedio. De los siete factores, R fue el de mayor grado de incertidumbre debido a la escasez de información, por lo que se tuvo que trabajar con datos disponibles escasos.

En virtud de que los mapas de vulnerabilidad son una guía para los tomadores de decisiones, lograrlos representa un trabajo que debe realizarse con la debida precaución, por lo que se requiere estar informado de nuevas herramientas metodológicas que simulen con mayor exactitud y precisión el entorno geohidrológico.

Dado que DRASTIC es uno de los métodos más viables para el diseño de estrategias y políticas

de protección y conservación de los recursos subterráneos, su uso resulta de suma utilidad, como en este caso cuya aplicación se realizó posterior al trazo del mapa de vulnerabilidad (Figura 5). Se sugiere que se realicen programas de muestreo y medición continua que actualicen la presente documentación y asimismo, que contemplen factores adicionales de importancia local y regional, tanto humanos como ambientales, relacionados con contaminantes específicos. Lo anterior a fin de aplicar nuevas herramientas que incluyan las geo-formas existentes, incorporándolas desde la superficie. Una herramienta metodológica sería el índice AVI (Aquifer Vulnerability Index) creado por Van & Sullivan (1992), para cuantificar la vulnerabilidad natural por medio de la resistencia hidráulica vertical al ocurrir el proceso de infiltración de agua por la zona no saturada. Otro método es el índice SINTACS (soggiacenza, infiltrazione, non saturo, tipología de lla cobertura, acquifero, conducibilità, superficie topográfica) desarrollado por Civita & Maio (2000), que aunque se trata de un método con una estructura compleja y que requiere un mapeo a mayor detalle, también contempla en los factores de vulnerabilidad la incidencia del agua superficial y el uso del suelo. De acuerdo al cono de abatimiento de la costa, el acuífero ya presenta zonas de alta y moderada "potencia" (vulnerabilidad) natural a la contaminación, por lo que es poco probable que dichos valores se atenúen; incluso pueden acentuarse de no ocurrir cambios en las prácticas de cultivo y riego. Es evidente la necesidad de fomentar el fortalecimiento de una cultura ambiental, de tal manera que se difundan estrategias adecuadas para proteger el flujo regional e intermedio, que son la fuerza motriz de la atenuación de procesos como la degradación de la calidad y la desertificación. Es urgente iniciar el manejo adecuado de este acuífero, porque al igual que en otros casos que deben resolver la vulnerabilidad que enfrentan en México, los resultados demuestran y confirman que la mayor vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea se encuentra en la zona costera (Pérez & Pacheco 2004).

Tabla 2. Factores D, R, A, S, T, I, C (D = nivel freático, R = recarga neta, A = material del acuífero, S = suelo, T = topografía, I = impacto de la zona no saturada, C = conductividad hidráulica), Índice DRASTIC (ID) y clasificación de la vulnerabilidad (V) de las 150 celdas en las que se dividió el acuífero del Río Sinaloa (adimensional).

Table 2. D, R, A, S, T, I, C factors (D = water table depth, R = net recharge, A = aquifer material, S = soil, T = topography, I = impact on the unsaturated zone, C = hydraulic conductivity), DRASTIC Index (ID) and classification of the vulnerability (V) for the 150 cells into which the Sinaloa River aquifer was divided (dimensionless).

No.Celda	D	R	A	S	T	I	C	ID	V	No.Celda	D	R	A	S	T	I	C	ID	V
1	45	24	15	21	1	24	6	136	Vmb	41	50	24	15	21	1	32	4	147	Vm
2	45	24	15	21	1	24	6	136	Vb	42	50	24	24	30	1	32	3	164	Va
3	35	3	15	21	1	24	6	105	Vmb	43	50	24	24	30	1	32	3	164	Va
4	35	24	15	21	1	28	3	127	Vb	44	35	3	24	30	1	28	3	124	Vb
5	35	15	12	30	1	24	3	120	Vb	45	35	24	18	9	1	28	3	118	Vmb
6	35	24	12	21	1	28	3	124	Vb	46	35	3	21	9	1	28	3	100	Vmb
7	35	24	18	0	1	24	3	105	Vmb	47	35	24	12	21	1	28	3	124	Vb
8	35	10	15	0	1	24	3	88	Vi	48	35	24	18	21	1	24	3	126	Vb
9	35	15	15	0	1	24	3	93	Vi	49	35	24	21	21	1	28	3	133	Vb
10	35	24	18	21	1	20	3	122	Vb	50	35	24	21	0	1	28	3	112	Vmb
11	35	3	15	21	1	28	6	109	Vmb	51	35	24	9	21	1	24	3	117	Vmb
12	35	24	24	21	1	24	3	132	Vb	52	50	24	12	21	1	20	3	131	Vb
13	35	24	15	21	1	20	3	119	Vmb	53	45	24	15	30	1	28	3	146	Vm
14	35	24	15	12	1	24	4	115	Vmb	54	35	12	9	30	1	28	3	118	Vmb
15	25	3	15	21	1	24	3	92	Vi	55	35	24	21	18	1	28	3	130	Vb
16	35	24	15	21	1	20	3	119	Vmb	56	35	24	15	9	1	24	3	111	Vmb
17	35	24	12	0	1	16	3	91	Vi	57	35	24	12	21	1	24	3	120	Vb
18	35	4	18	21	1	12	3	94	Vi	58	35	24	21	21	1	24	4	130	Vb
19	25	24	18	21	1	16	3	108	Vmb	59	35	12	21	21	1	32	3	125	Vb
20	25	10	21	21	1	16	3	97	Vi	60	35	24	24	21	1	32	4	141	Vm
21	45	3	15	30	1	28	3	125	Vb	61	50	24	9	21	1	28	3	136	Vb
22	35	24	15	30	1	24	3	132	Vb	62	50	24	12	21	3	24	3	137	Vb
23	35	10	12	21	1	20	6	105	Vmb	63	35	24	18	21	3	24	3	128	Vb
24	35	24	21	10	1	20	3	114	Vmb	64	35	12	15	30	3	28	4	127	Vb
25	35	24	12	30	1	20	6	128	Vb	65	35	24	18	18	3	24	3	125	Vb
26	35	24	15	21	1	20	6	122	Vb	66	35	24	12	30	1	24	3	129	Vb
27	35	24	15	9	1	16	3	103	Vmb	67	35	24	18	21	1	24	3	126	Vb
28	15	24	18	21	1	20	3	102	Vmb	68	35	24	24	21	1	36	6	147	Vm
29	15	24	21	21	1	24	3	109	Vmb	69	35	24	24	21	1	36	6	147	Vm
30	15	24	21	0	1	28	3	92	Vi	70	35	24	21	21	1	36	3	141	Vm
31	50	6	21	21	1	28	4	131	Vb	71	50	24	12	21	3	24	3	137	Vb
32	50	24	24	18	1	24	3	144	Vm	72	45	24	18	21	3	24	3	138	Vb
33	45	24	24	30	1	20	3	147	Vm	73	50	24	12	21	3	20	3	133	Vb
34	35	24	18	30	1	20	3	131	Vb	74	35	24	18	21	3	24	3	128	Vb
35	35	24	12	30	1	24	3	129	Vb	75	35	24	18	18	3	20	3	121	Vb
36	35	24	18	21	1	24	6	129	Vb	76	35	24	12	9	1	16	3	100	Vi
37	25	24	15	9	1	24	3	101	Vmb	77	35	24	12	30	1	16	3	121	Vb
38	35	3	18	21	1	28	3	109	Vmb	78	35	24	21	21	1	32	3	137	Vb
39	35	24	15	21	1	28	3	127	Vb	79	35	24	21	21	1	32	3	137	Vb
40	35	24	18	0	1	28	3	109	Vmb	80	35	24	21	21	1	36	3	141	Vm

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los profesionales y estudiantes del CIIDIR-IPN Sinaloa (Guasave, Sinaloa) y del

CIBNOR (La Paz, B.C.S.) que participaron en las distintas etapas de la ejecución de este trabajo. Al CONACYT por el apoyo económico brindado al CIIDIR Sinaloa y al CIBNOR SC, mediante el proyecto

Tabla 2. Continuación.
Table 2. Continued.

No.Celda	D	R	A	S	T	I	C	ID	V	No.Celda	D	R	A	S	T	I	C	ID	V
81	50	24	15	21	3	24	4	141	Vm	116	50	24	18	30	5	36	3	166	Va
82	50	24	18	21	5	24	3	145	Vm	117	50	24	18	21	5	36	3	157	Vm
83	35	24	12	21	5	24	3	124	Vb	118	50	24	15	21	3	36	3	152	Vm
84	35	24	15	30	5	28	6	143	Vm	119	45	24	15	21	3	36	3	147	Vm
85	35	24	18	30	3	20	3	133	Vb	120	45	24	15	21	1	36	3	145	Vm
86	50	24	12	9	3	16	3	117	Vmb	121	50	24	24	21	5	12	6	142	Vm
87	35	24	12	30	3	16	3	123	Vb	122	50	24	24	21	9	12	3	143	Vm
88	35	24	15	21	1	28	3	127	Vb	123	50	24	24	21	9	16	3	147	Vm
89	35	24	15	21	1	32	3	131	Vb	124	45	24	21	21	5	24	3	143	Vm
90	35	24	18	21	1	36	3	138	Vb	125	45	24	21	30	5	36	3	164	Va
91	50	24	18	21	3	24	3	143	Vm	126	50	24	18	30	5	36	3	166	Va
92	50	24	18	21	5	24	3	145	Vm	127	50	24	18	21	5	36	3	157	Vm
93	45	24	15	21	5	28	3	141	Vm	128	50	24	18	21	5	36	4	158	Vm
94	35	24	15	30	5	24	6	139	Vb	129	50	24	15	21	3	32	3	148	Vm
95	35	24	15	9	3	20	3	109	Vmb	130	45	24	18	21	3	36	3	150	Vm
96	45	24	15	21	3	24	3	135	Vb	131	50	24	24	21	9	12	3	143	Vm
97	50	24	12	30	5	24	3	148	Vm	132	50	24	24	21	9	12	4	144	Vm
98	45	24	15	21	3	20	3	131	Vb	133	50	24	24	21	9	20	3	151	Vm
99	35	24	15	21	1	32	3	131	Vb	134	50	24	21	21	9	24	3	152	Vm
100	35	24	15	21	1	32	3	131	Vb	135	50	24	21	30	9	28	3	165	Va
101	50	24	21	21	5	20	3	144	Vm	136	50	24	21	21	9	36	3	164	Va
102	50	24	24	21	5	24	3	151	Vm	137	50	24	18	21	5	36	3	157	Vm
103	50	24	18	21	5	32	3	153	Vm	138	50	24	18	21	5	36	3	157	Vm
104	35	24	18	30	5	20	4	136	Vb	139	50	24	18	21	5	36	3	157	Vm
105	35	24	15	18	3	28	3	126	Vb	140	50	24	15	21	3	36	4	153	Vm
106	50	24	18	30	5	28	3	158	Vm	141	50	24	24	21	9	12	3	143	Vm
107	50	24	15	30	5	28	3	155	Vm	142	50	24	24	21	9	12	3	143	Vm
108	50	24	18	21	3	32	4	152	Vm	143	50	24	24	21	9	16	4	148	Vm
109	45	24	18	21	1	36	3	148	Vm	144	50	24	21	21	9	24	3	152	Vm
110	35	24	15	21	1	36	3	135	Vb	145	50	24	21	21	9	28	3	156	Vm
111	50	24	21	21	3	16	3	138	Vb	146	50	24	21	21	9	32	3	160	Va
112	50	24	24	21	5	16	3	143	Vm	147	50	24	18	21	5	32	3	153	Vm
113	50	24	24	21	9	20	3	151	Vm	148	50	24	18	21	5	32	3	153	Vm
114	35	24	21	21	5	28	3	137	Vm	149	50	24	18	21	5	32	3	153	Vm
115	45	24	18	30	3	36	3	159	Vm	150	50	24	18	21	5	32	3	153	Vm

134460 "Determinación y construcción de indicadores de la huella hídrica y desertificación como consecuencia de la sobreexplotación agropecuaria y del

cambio climático en cuencas" clave interna 180 C. Asimismo, a la CONAGUA Delegación en Sinaloa y Organismo de Cuenca Pacífico Norte, Culiacán, Sin.

LITERATURA CITADA

- Aller LT, Lerh JH, Petty RJ, Hackett G (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S. Environmental Protection Agency, 600/2-87/035, Ada. OK. 622 pp.
- Anónimo (2003) Vulnerabilidad de Acuíferos. E-book. (<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.htm>. 2008).
- Canter LW (1997) Nitrates in groundwater. CRC Press Inc. Lewis Publisher, Boca Ratón, Florida, USA. 129 pp.

- Civita M, Forti P, Meccheri I, Piccini L, Panzini G (1991) Pollution vulnerability map for the aquifers of the Apuan Alps (Tuscany-Italy) National Research Group for the Defense against Hydrogeological Disasters. Firenze, Italy, 111 pp.
- Civita M, De Maio M (2000) SINTACS R5 - Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico. SINTACS R5 - A new parametric system for the assessment and automatic mapping of the groundwater vulnerability to contamination. Pitagora, Bologna, 226 pp.
- Emery X (2007) Conditioning simulations of Gaussian random fields by ordinary kriging. Mathematical Geology 39 (6): 607-623.
- Foster S, Hirata R (1988) Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. Organización Panamericana de la Salud (OMS). 74 pp.
- Hiscock H (2005) Hydrogeology. Principles and practice. Blackwell, 389 pp.
- Humphries R (1986) Los Mochis: historia oral de una ciudad. 2 ed. Universidad de Occidente. Los Mochis, Sinaloa. México. 305 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) (2005) Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. Gobierno del Estado de Sinaloa. Culiacán, Sin. México. 321 pp.
- Llanes-Cárdenes O (2007) Evaluación espacio-temporal de la pérdida de suelo: indicadores de erosión hídrica y eólica para el Valle de Guasave, Sinaloa. Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN-Sinaloa. Guasave, Sinaloa, México 137 pp.
- Lobo-Ferreira JP, Oliveira MM (1997) DRASTIC Groundwater vulnerability mapping of Portugal in: Groundwater: An Endangered Resource, Proceeding of Theme C. 27 th Congress of the International Association for Hydraulic Research. San Francisco CA, USA. 132-137.
- Manson RH (2007). "Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH". Informe final. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México. 94 pp.
- Martínez M, Delgado P, Fabregat V, (1998) Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas: un problema pendiente. Instituto Tecnológico Geominero de España (AIH-GE). Valencia, España. pp. 413-420.
- Morales EC, Parada S (2005) Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, República de Chile. 267 pp.
- Norzagaray CM (2003) Flujo regional en acuíferos, sus causas y efectos en la dispersividad hidrodinámica: Un caso de estudio. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones y de Estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Mérida, Yucatán. México. 250 pp.
- Norzagaray CM, Herrera BJ, Ladrón GT (2004) Variación espacial de la conductividad hidráulica para suelos del acuífero costero de Guasave, Sinaloa. Revista Tláloc Asociación Mexicana de Hidráulica 30(1): 11-16.
- Pérez C R, Pacheco AJ (2004) Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Ingeniería 8 (1): 33-42
- Piscopo G (2001) Groundwater vulnerability map explanatory notes - MacIntyre Catchment. NSW Department of Land and water Conservation. 13 pp.

- PEDUES (2007) Plan Estatal de Desarrollo Urbano del estado de Sinaloa (PEDUES). Gobierno del estado-Secretaría de Desarrollo Social y Sustentable. Culiacán, Sinaloa, México. 133 pp.
- Secunda S, Collin ML, Molloul J (1998) Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. Journal of Environmental Management 54: 39-57.
- SEMARNAT (2006) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) Diario Oficial (Primera Sección). Acuerdo que da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas del Río Sinaloa 1, Arroyo Ocoroni, Arroyo Cabrera y Río Sinaloa 2. México D.F. 24 de Noviembre. 76 pp.
- Serway RA, Jewett JW (2005) Física (2 Vol.). Thomson Edit. México, 268 pp.
- Sharadghah S (2001) Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en Jordania. Aplicación del modelo DRASTIC. Trabajo de Investigación. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 165 pp.
- TMISA (1978) Estudio de Evaluación de acuíferos en la zona Fuerte - Sinaloa, en el estado de Sinaloa. Técnicas Modernas de Ingeniería (TMISA). Culiacán, Sinaloa. México. 314 pp.
- Tóth J (2000) Las aguas subterráneas como agente geológico. Causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero 111 (4): 9-26.
- Toutcha L, Sosa-Soto R (2005) La Flora de las Barrancas del Cobre, Chihuahua, México. Ecología Aplicada 4 (1-2): 17-23.
- USEPA (1993) A Review of Methods for Assessing Aquifer Sensitivity and Ground Water Vulnerability to pesticide Contamination. Office of Water (4602) 813-R-93-002, 97 pp.
- Valle MO (2002) Planeación regional bidimensional del agua subterránea en el Valle de Guasave, Sinaloa, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Sinaloa. Guamúchil, Sinaloa. México. 189 pp.
- Van EM, Sullivan JB (1992) Organochlorine Pesticides In Sullivan, J.B. and Krieger, G.R., Hazardous Materials Toxicology, Clinical Principles of Environmental Health. Williams & Wilkins, Baltimore, MD. USA. 72 pp.
- Velásquez AJ, Mas JF, Díaz GR, Mayorga SR, Alcántara PC, Castro RT, Fernández T, Bocco G, Ezcurra E, Palacio JL (2002) Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta Ecológica 62: 21-37.