

Evidencias de interacción entre aguas superficiales y subterráneas a través de las zonas hiporreicas mediante el uso de la hidroquímica y el análisis multivariado en el acuífero de Cuajinicuilapa, Guerrero, México

Ismael del Carmen Sandoval Montes
y José Rodríguez Rocha

El acuífero de Cuajinicuilapa en el estado de Guerrero, México, se ubica a la salida de la cuenca hidrográfica del río Quetzala, donde se ha depositado una serie de relleños aluviales que cubren una fosa tectónica, lo que permite almacenar agua subterránea de donde se extraen importantes gastos para el riego de cultivos; dados los escurrimientos superficiales y el régimen de lluvia, el acuífero no presenta problemas de abatimiento, sin embargo, la calidad fisicoquímica se ha visto ligeramente alterada, en especial por cuerpos de agua superficiales que presentan eutrofización debido a que han quedado aislados de las corrientes superficiales y sólo se renuevan cuando se presentan grandes avenidas, formando en el subsuelo zonas hiporreicas, que influyen en la calidad fisicoquímica del agua subterránea de las regiones aledañas, por lo que fue necesario conocer el modelo geohidrológico del área y la aplicación de herramientas estadísticas para su identificación, apoyados en un sistema de información geográfica (SIG) levantado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Palabras clave: zona hiporreica, SIG, fosa tectónica, análisis multivariado.

The Cuajinicuilapa aquifer in the state of Guerrero, Mexico, is located off the Quetzala River basin, where they have lodged a series of alluvial fills covering a rift valley, which can store groundwater are extracted substantial volumes for the irrigation of crops, given the runoff and the rainfall, the aquifer is not a problem of depression, but the physicochemical quality has been impacted, particularly for surface water eutrophication presented because have been isolated from the surface currents and are renewed only when there are major avenues, forming hyporheic zones, which influence the chemical quality of groundwater in the surrounding areas, so it was necessary to know the area hydrological modelling and implementation statistical tools for identification, supported by a GIS built by INEGI.

Keywords: hyporheic zone, GIS, rift valley, multivariate analysis.

Nota: los autores agradecen a la Dirección de Información de Recursos Naturales y Medio Ambiente del INEGI por permitir el uso de la información para la elaboración del presente trabajo, así como a los árbitros anónimos quienes, con sus comentarios, ayudaron a mejorarlo de manera sustancial.



Yellowstone panorama@istockphoto.com

Introducción

Para entender la interacción, de inicio compleja, entre el agua superficial y subterránea, se hace necesario conocer los factores climáticos, morfológicos, geológicos y bióticos a través de un modelo hidrogeoecológico en el que se consideren los mecanismos de recarga del acuífero, sus interacciones, la importancia ecológica y el impacto que pudiera presentarse en la calidad del agua subterránea del área.

El acuífero de Cuajinicuilapa se localiza al sur de la República Mexicana, en la Costa Chica de Guerrero; se encuentra formado por rellenos aluviales que cubren una fosa tectónica; su condición es de tipo libre donde la recarga principal ingresa al sistema de manera directa a través de las corrientes superficiales que discurren por la planicie aluvial por medio

de cuerpos de agua (lagos) que se han formado en los meandros abandonados y por flujos horizontales subterráneos que alimentan al acuífero.

Respecto a su calidad fisicoquímica, ésta se ha visto influenciada por la recarga que el acuífero recibe a través de los cuerpos de agua superficiales que han quedado aislados del flujo transitorio (originando la proliferación de lirios acuáticos) y que se manifiesta en las características del agua subterránea de las zonas adyacentes, sin incidir de manera alarmante en el acuífero principal debido a la cantidad de líquido infiltrado a partir de las corrientes superficiales y por flujos subterráneos, que diluyen las concentraciones de aniones y cationes principales, identificado mediante la interpretación de los parámetros fisicoquímicos reportados en un SIG levantado por el INEGI (INEGI, 2010, en proceso de liberación).

Geología estructural y modelo geohidrológico conceptual

De manera estructural, la zona rocosa muestra un patrón de fracturamiento con una ligera tendencia NO-SE y NE-SO, así como algunos diques que se presentan en estas mismas direcciones; sin embargo, como se sitúan en la parte alta de la sierra, éstas sólo dan origen a pequeños manantiales que alimentan a los ríos Quetzala y Santa Catarina, corrientes principales que se unen al norte de la planicie aluvial para adentrarse en ésta y discurrir por la planicie aluvial (ver figuras 1, 3 y 4), de donde el acuífero recibe el aporte principal de su recarga, sin menospreciar las entradas que se llevan a cabo al SE del área a través de flujos subterráneos y que contribuyen a resarcir la extracción y diluir las concentraciones minerales ocasionadas por la evaporación en los cuerpos de agua superficiales que se infiltran hacia el subsuelo.

En la parte baja de la cuenca, cubierta por el relleno aluvial, no se identifica de forma superficial alguna estructura geológica de trascendencia, pero es probable que la acumulación del relleno aluvial se encuentre asociada a una fosa tectónica, que se deduce a partir de las profundidades y la forma del basamento cristalino identificado en trabajo de la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1984), actualmente Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

De acuerdo con la metodología para calcular los balances de agua subterránea que lleva a cabo la CONAGUA en los acuíferos nacionales, el de Cuajinicuilapa no se ha visto alterado por las extracciones que hacen los usuarios del agua subterránea debido a que "...existe disponibilidad para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica...", con poco más de 140 Mm³/año (CONAGUA, 2002); asimismo, los valores de transmisividad calculados para la zona granular oscilan entre 7 y 40 x 10⁻³ m²/s, que los clasifica como materiales porosos intergranulares, constituidos por gravas y arenas (Villanueva e Iglesias, 1984) con un coeficiente de almacenamiento estimado en 0.15 (SARH, 1984).

Respecto a la disponibilidad del líquido en la zona de estudio, la CONAGUA (2003) la considera, a nivel nacional, como la tercera con mayor disponibilidad en agua superficial debido a las precipitaciones y volúmenes de escurrimientos, donde sólo se aprovecha 5% del total que circula por la zona, dado que los ríos casi no han sido impactados por desviaciones o extracciones, lo cual origina un aporte constante debido a que sólo se ha construido una presa derivadora sobre el río Cortijo (norte de Cuajinicuilapa) que, por lo suave de la pendiente del terreno, se levantó para desviar una pequeña parte del gasto de escurrimiento que se llena muy rápido y se desborda, por lo que prácticamente es de circulación continua.

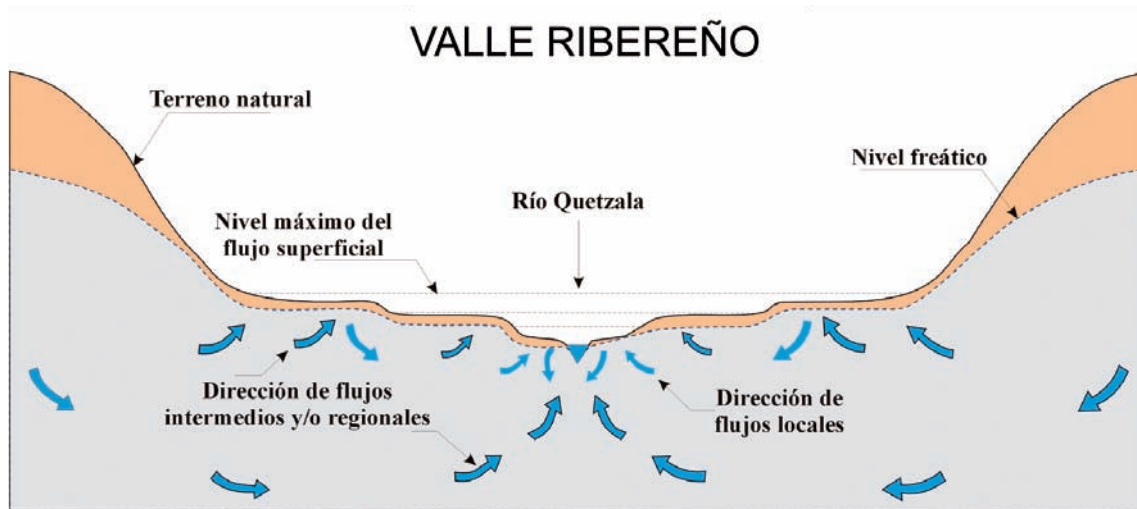
Con base en el modelo geohidrológico conceptual del acuífero, por los valores de transmisividad hidráulica reportados y las corrientes superficiales que drenan la zona se deduce que la unidad hidrogeológica es de tipo libre, donde la recarga principal se lleva a cabo a lo largo de los lechos de las corrientes superficiales a través de la superficie de contacto definida entre los materiales granulares permeables y las rocas impermeables, así como por infiltraciones de agua de lluvia precipitada de manera directa en la superficie del valle (ver figura 2); su descarga se produce por evapotranspiración en áreas donde los niveles freáticos se presentan someros y, en menor medida, por bombeo. En reporte de la SARH (1984), las recargas y descargas son numéricamente equivalentes, del orden de 317 Mm³/año.

La creciente demanda social de un medioambiente más limpio ha impuesto en la planificación hidráulica la consideración de que en los cauces circulen, al menos, lo que se ha dado en llamar *caudales ecológicos* o *caudales mínimos medioambientales*, en el entendido de que sean capaces de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial con el fin de sostener la integridad ecológica del sistema, sin disminuir su complejidad estructural y biodiversidad.

En la figura 3 se presentan de manera esquematizada las corrientes principales, la ubicación de

Figura 2

Modelo geohidrológico conceptual en el valle ribereño del río Quetzala, en la zona de Cuajinicuilapa, Guerrero



Fuente: adaptado de Winter *et al.*, 1998.

Figura 3

Esquema de corrientes principales, ubicación de estaciones hidrométricas y resumen de 10 años de observaciones en el acuífero de Cuajinicuilapa, Guerrero



Fuente: SARH, 1984.

estaciones hidrométricas en el área, así como un resumen de los aforos realizados durante 10 años por la SARH (1984) y que confirma la anterior aseveración.

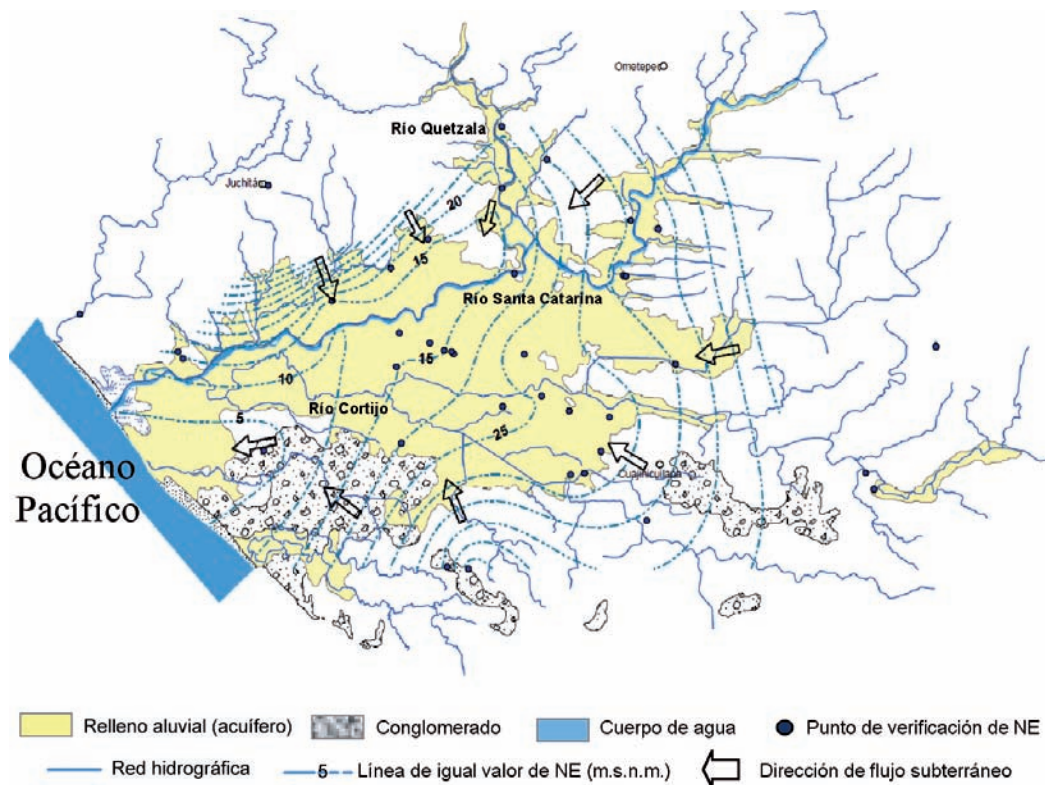
Método de trabajo

Para conocer el comportamiento de los flujos subterráneos en la zona de estudio, se identificaron, geoposicionaron y se les midió el nivel estático a 39 obras de extracción (pozos y norias), así como el registro de la altura de los brocales donde los había para, después — apoyados en los modelos digitales de elevación— identificar la altitud de los sitios en los que se ubicaban éstos, con lo cual se dedujeron las direcciones de los flujos subterráneos (ver figura 4).

Durante la etapa de campo, en las obras de extracción que se encontraban trabajando (previo análisis en gabinete de la ubicación de los sitios a muestrear para que éste resultara lo más sistemático posible), se colectó una muestra de agua de un litro, con base en el protocolo de muestreo desarrollado en el Laboratorio de Análisis de Materiales del INEGI, que fueron analizadas para determinar el contenido de aniones y cationes principales (ver tabla 1), además de algunos calificadores, como: dureza, relación de adsorción de sodio (RAS), calidad del agua para riego, familia y agresividad, entre otros; asimismo, en las descargas directas se le determinó la temperatura, conductividad eléctrica y pH mediante un conductivímetro portátil, previa calibración del equipo mediante soluciones *buffer*.

Figura 4

Red hidrográfica, líneas de igual elevación del nivel estático y dirección de flujos subterráneos en el acuífero de Cuajinicuilapa, Guerrero



Fuente: INEGI, 2010, en proceso de liberación.

**Información de campo y datos de los iones mayores presentes
en las muestras de agua subterránea**

Núm.	Tipo de obra	Temp. (° C)	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Familia de agua
1	Noria	29.5	8.54	157.0	19.84	5.83	20.94	5.08	13.45	102.51	0.00	9.57	26.09	Cálcica sódica-bicarbonatada
2	Noria	29.9	7.85	138.5	17.03	4.01	10.69	2.74	8.17	98.24	0.00	0	1.18	Cálcica sódica-bicarbonatada
3	Noria	29.4	7.97	182.3	23.45	4.74	17.96	3.28	14.51	111.06	8.40	3.19	1.05	Cálcica sódica-bicarbonatada
4	Noria	28.5	7.27	337.0	51.10	9.96	23.84	3.48	26.94	192.21	0.00	9.57	35.20	Cálcica sódica-bicarbonatada
5	Noria	29.8	8.05	118.1	14.03	3.04	7.13	3.28	13.93	44.54	0.00	6.38	5.08	Cálcica sódica-mixta
6	Pozo	29.7	7.62	344.0	45.89	13.12	34.26	4.11	13.88	217.84	21.00	6.38	5.64	Mixta-bicarbonatada
7	Pozo	29.8	7.80	211.0	22.04	5.35	24.83	3.17	14.89	132.41	0.00	12.70	0.87	Cálcica sódica-bicarbonatada
8	Pozo	31.6	8.07	112.7	9.42	2.43	14.30	2.15	12.82	50.34	0.00	4.79	10.29	Cálcica sódica-bicarbonatada clorurada
9	Pozo	29.1	7.41	223.0	20.24	8.38	26.44	1.52	14.51	136.68	0.00	15.95	0.87	Mixta-bicarbonatada
10	Pozo	29.4	7.96	248.0	31.06	10.69	25.29	1.84	9.61	162.31	16.80	9.57	3.10	Mixta-bicarbonatada
11	Noria	28.9	7.89	261.0	37.07	8.63	19.24	5.63	15.85	166.58	0.00	15.95	11.90	Mixta-bicarbonatada
12	Pozo	29.2	7.68	176.8	19.84	5.10	17.93	2.35	13.02	98.24	0.00	7.98	2.54	Cálcica sódica-bicarbonatada
13	Noria	28.2	7.16	231.0	32.67	7.05	19.27	4.46	15.61	153.77	0.00	12.76	0.87	Cálcica sódica-bicarbonatada
14	Pozo	30.8	6.97	146.8	15.83	4.62	9.66	8.52	9.13	98.24	0.00	3.19	1.36	Mixta-bicarbonatada
15	Pozo	29.2	6.85	258.0	18.64	5.10	15.22	52.08	22.24	153.77	0.00	9.57	3.84	Cálcica sódica-bicarbonatada
16	Pozo	28.3	7.79	119.0	14.83	2.92	8.46	1.88	20.08	57.05	0.00	3.19	0.68	Cálcica sódica-bicarbonatada
17	Pozo	30.3	7.79	312.0	52.91	9.72	27.40	3.09	14.41	222.11	12.60	19.14	2.85	Cálcica sódica-bicarbonatada
18	Pozo	30.5	7.74	277.0	56.31	2.92	11.50	1.80	6.72	166.58	7.80	7.98	9.67	Cálcica-bicarbonatada
19	Pozo	31.5	7.54	153.5	20.64	2.19	11.77	2.42	5.57	80.55	0.00	4.79	12.64	Cálcica sódica-bicarbonatada
20	Noria	30.9	7.53	103.9	4.21	2.92	15.63	2.74	4.90	55.53	0.00	0.00	11.28	Sódica-bicarbonatada

**Información de campo y datos de los iones mayores presentes
en las muestras de agua subterránea**

Núm.	Tipo de obra	Temp. (° C)	pH	CE (µS cm ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Familia de agua
21	Pozo	30.3	7.47	130.2	14.23	4.13	8.55	2.54	1.92	64.07	0.00	12.76	0.50	Mixta-bicarbonatada
22	Pozo	30.4	7.45	184.5	22.65	4.62	18.46	2.19	7.20	128.14	0.00	3.19	3.47	Cálcica sódica-bicarbonatada
23	Pozo	28.9	8.18	113.7	14.63	2.92	7.43	1.41	3.36	72.61	0.00	0.00	1.36	Cálcica sódica-bicarbonatada
24	Pozo	28.6	7.36	305.0	40.68	9.96	20.53	2.58	18.73	183.67	0.00	19.14	1.86	Mixta-bicarbonatada
25	Pozo	29.9	7.17	420.0	43.89	15.55	69.38	0.82	3.36	384.43	0.00	15.95	1.05	Cálcica sódica-bicarbonatada
26	Noria	29.1	7.10	476.0	82.97	25.39	27.45	1.92	49.23	243.47	8.40	35.10	89.24	Magnésica cálcica-bicarbonatada clorurada
27	Pozo	29.0	7.03	430.0	53.71	16.77	41.24	17.09	10.95	341.71	0.00	25.52	3.59	Mixta-bicarbonatada
28	Pozo	30.1	7.49	734.0	114.83	29.40	84.03	2.70	148.22	124.18	36.30	98.91	129.58	Mixta
29	Pozo	27.7	7.48	141.3	16.03	4.74	6.87	1.37	0.00	91.53	0.00	0.00	0.81	Mixta-bicarbonatada
30	Noria	29.1	7.12	262.0	33.27	10.33	22.88	2.11	13.45	189.16	0.00	12.76	1.98	Mixta-bicarbonatada
31	Noria	28.4	7.50	118.4	13.63	4.25	8.97	3.52	3.36	87.87	0.00	1.60	1.24	Mixta-bicarbonatada
32	Pozo	29.3	7.23	243.0	28.26	9.23	18.41	3.60	10.09	166.58	0.00	6.38	3.16	Mixta-bicarbonatada
33	Noria	29.2	6.71	493.0	71.94	26.97	40.00	7.94	43.90	305.41	7.80	35.10	33.09	Mixta-bicarbonatada
34	Noria	30.1	7.00	455.0	48.90	19.68	54.35	0.66	63.78	191.30	19.80	28.71	15.18	Mixta-bicarbonatada
35	Noria	29.8	7.00	761.0	96.39	53.22	114.03	1.33	205.57	422.87	8.40	86.14	58.38	Mixta
36	Pozo	29.1	8.25	147.8	15.63	4.25	11.04	1.49	5.81	81.77	0.00	6.03	1.36	Mixta-bicarbonatada
37	Pozo	28.1	7.65	181.3	15.23	4.74	21.68	2.54	5.81	100.68	0.00	9.57	0.31	Cálcica sódica-bicarbonatada
38	Noria	28.9	7.63	433.0	69.34	3.52	57.11	1.33	30.69	294.73	0.00	41.48	0.74	Cálcica sódica-bicarbonatada
39	Pozo	29.6	7.59	167.1	12.42	2.19	26.71	1.60	7.83	90.61	6.60	0.00	1.24	Sódica-bicarbonatada

Fuente: INEGI, 2010, en proceso de liberación.

Discusión y resultados

Con base en la información de los niveles estáticos obtenida en campo para la fecha del recorrido, se identificó que la dirección del flujo subterráneo tiende a seguir la pendiente natural del terreno (por lo general NE-SO), como corre el río Santa Catarina, principal afluente en la zona por su desarrollo y el aporte que hace al acuífero y que pudiera ser indicativo de la influencia que tiene sobre éste; aun cuando el nivel estático se ha profundizado de forma ligera, en especial en la zona centro del acuífero aluvial, no se identifican conos de abatimiento que pudieran ocasionar algún problema de intrusión marina debido a la diferencia de cargas hidráulicas (ver figura 4) y que se confirmó mediante el análisis de la posible presencia de algunos elementos, como: el ion Na^+ , Cl^- y la conductividad eléctrica, los cuales pudieran auxiliar en la identificación de alguna anomalía hidroquímica asociada a esta naturaleza (Neri, 2007).

Analizando los resultados reportados por el laboratorio de las 39 muestras ingresadas, se

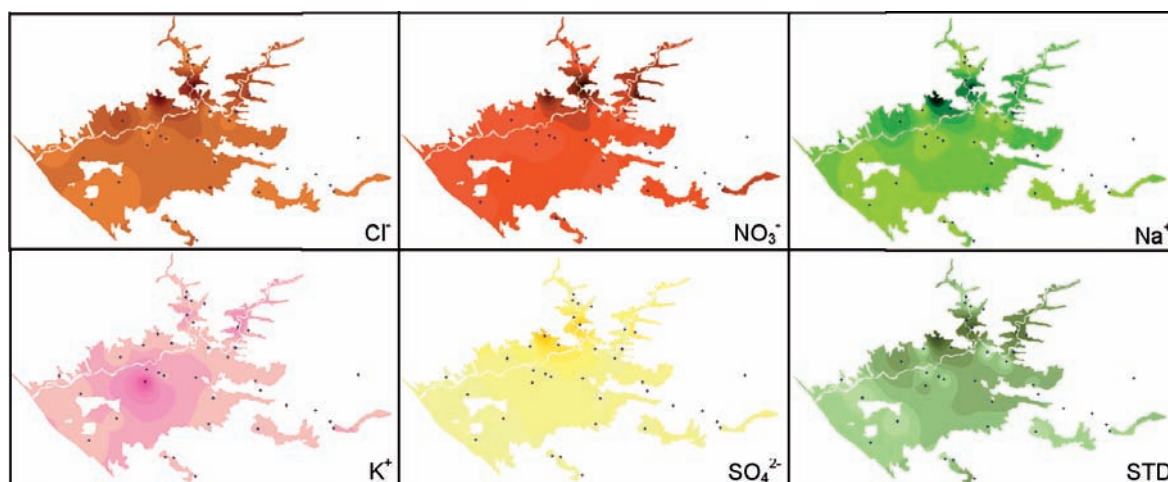
comprobó el balance de electro-neutralidad entre aniones y cationes, cuyos errores resultaron inferiores a 6%, por lo que fueron considerados como aceptables (Hem, 1985), procediendo a la identificación de los sitios donde se presentaban las concentraciones más significativas mediante el uso de la Geoestadística¹ (ver figura 5). El método utilizado para la elaboración de las configuraciones de los parámetros fisicoquímicos fue el Kriggin, que es el más adecuado para la información que deseamos representar.

De las anomalías identificadas en el agua subterránea mediante esta metodología, destacan las asociadas a los cuerpos de agua superficiales formados en los meandros de los ríos, donde se almacena el líquido de los periodos de grandes avenidas que, al quedar aislado de las corrientes superficiales de régimen transitorio, la temperatura y la carga de nutrientes que éste trae origina un proceso

¹ Conjunto de técnicas para resolver problemas de estimación que involucran variables espaciales georreferenciadas, representados por algunos iones, como: los NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y los STD, entre otros.

Figura 5

Distribución de elementos presentes en el agua subterránea del acuífero granular de Cuajinicuilapa, Gro. A mayor concentración, mayor tonalidad en el color. Los puntos indican el sitio de muestreo



Fuente: INEGI, 2010, en proceso de liberación.

de eutrofización² ocasionado por las descargas de aguas residuales domiciliarias sin tratamiento de las localidades ubicadas aguas arriba, el uso de fertilizantes y el lavado de suelos por la deforestación.

Asociado a este fenómeno se encuentra la formación de zonas hiporreicas en el subsuelo, que es la interface que vincula el cuerpo de agua superficial y la zona saturada del acuífero, donde se lleva a cabo la interacción o mezcla entre el agua superficial y subterránea (ver figura 6), cediendo algunas de las características fisicoquímicas de la superficie hacia el acuífero, como se identifica en las configuraciones de algunos de los elementos químicos de la figura 5. Desde el punto de vista biológico, estas zonas generan un gran interés debido a los diferentes ecosistemas que se desarrollan en esta capa que, a su vez, sirven de protección para los organismos que las habitan durante las etapas de grandes avenidas.

Para conocer la tendencia de posibles procesos de mezclas y consecuente evolución química

² Proliferación excesiva de plantas acuáticas debido al enriquecimiento del agua superficial con nutrientes primarios, en especial nitrógeno y fósforo presentes en el agua superficial (Winter *et al.*, 1998).

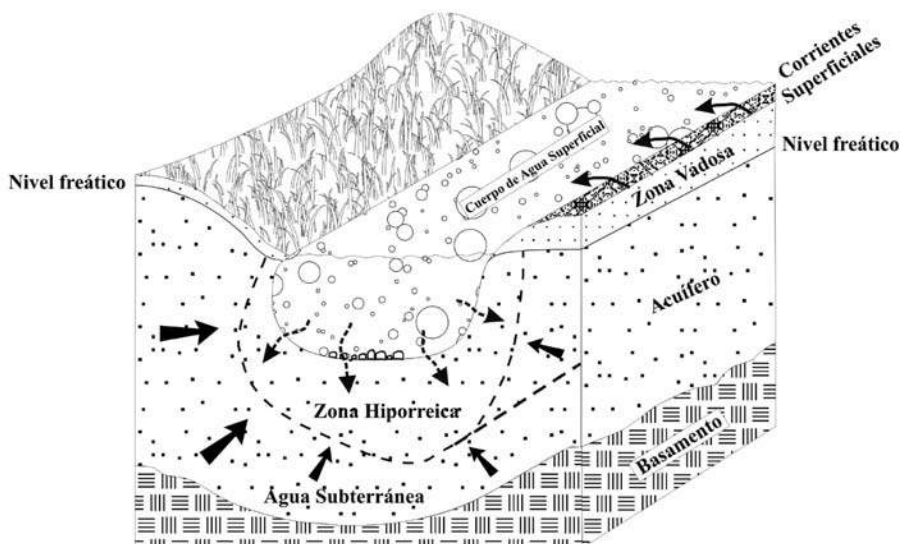
(registrada en las muestras de agua subterránea analizadas por el laboratorio del INEGI), se utilizó el diagrama de Piper, en el cual se puede apreciar que, debido a la posición que guardan en el gráfico, éstas tienden a ubicarse en la zona de intercambio catiónico, así como de procesos de mezclas principalmente, con un ligera tendencia hacia la disolución de yesos-sulfuros presentes en las rocas con las que entra en contacto durante su trayecto (ver figura 7).

Asimismo, mediante estos diagramas triangulares se identificaron las familias de agua (ver tabla 1), donde su agrupamiento está en función del catión y anión predominantes y que son los que le dan *nombre y apellido* a la muestra de agua. La familia dominante fue la cálcica sódica-bicarbonatada (16 muestras), en segundo lugar se ubicó la mixta-bicarbonatada (15 muestras), sobre todo.

Con el propósito de diferenciar mediante la química del agua la recarga con la que se sustenta el acuífero de Cuajinicuilapa, se utilizó la metodología desarrollada por Miffilin (1968), en la que considera las órdenes de magnitud de los indicadores

Figura 6

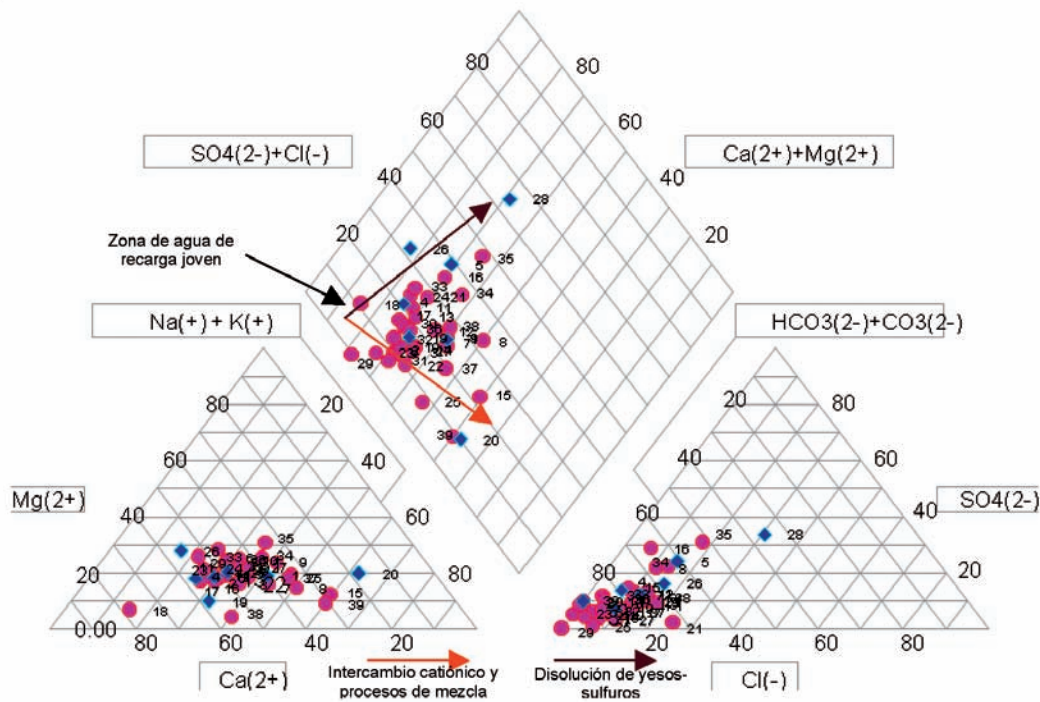
Modelo descriptivo de la dinámica del agua en la zona hiporreica influenciado por el agua superficial y subterránea



Fuente: modificado de Williams, 1993.

Figura 7

Diagrama de Piper que muestra la posible evolución química del agua subterránea de las muestras de agua del acuífero de Cuajinicuilapa, Guerrero



Fuente: INEGI, 2010, en proceso de liberación.

hidrogeoquímicos $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ para clasificar los flujos en: locales, intermedios y regionales.

En el primero se ubicaron 30 muestras, siete de ellas se catalogaron como de flujos intermedios y dos más se posicionaron en el extremo de la gráfica, sea por alimentación de flujos regionales o por fuentes externas que están modificando la calidad del agua subterránea en esos sitios y que no fueron identificadas durante el recorrido de campo (ver figura 8).

Como complemento de la información, se llevó a cabo un análisis multivariado con los resultados de las muestras, que es un herramienta estadística que proporciona resultados importantes en el estudio de variaciones geoquímicas muy sutiles en el agua subterránea, las cuales no pueden ser obtenidas por métodos convencionales y que permite

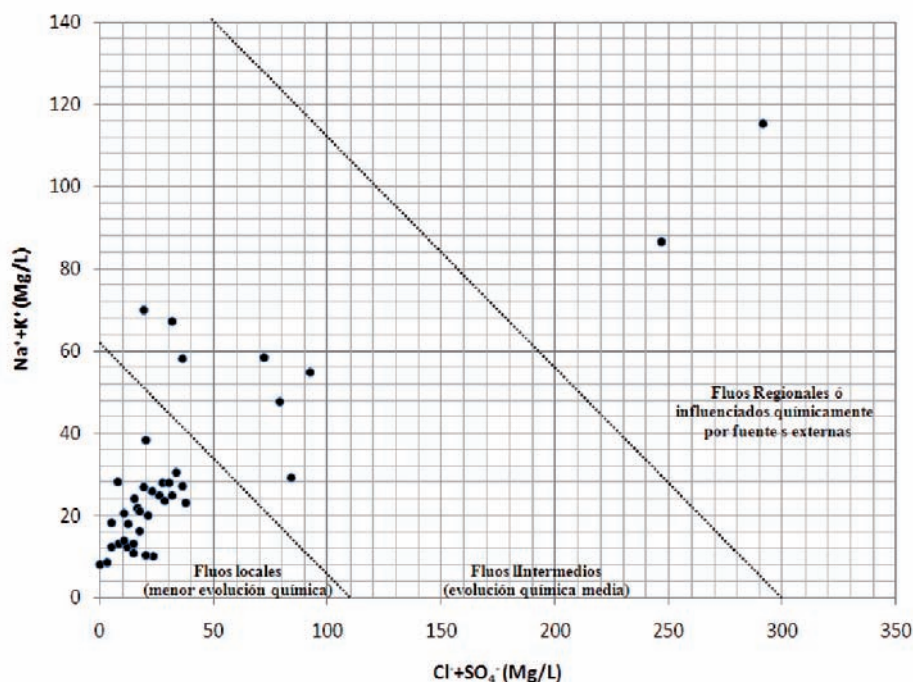
diferenciar acuíferos de origen similar, debido a que se utiliza casi toda la información obtenida en campo y la reportada por el laboratorio.

Para su elaboración, se diseñó una matriz $A \times B$, donde A simboliza las aprovechamientos muestreados en el acuífero de Cuajinicuilapa, representados por 15 norias y 24 pozos y B , las variables fisicoquímicas (aniones y cationes principales: SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), temperatura, pH y conductividad eléctrica (ver tabla 1); el software que se utilizó para el análisis de la información fue el PASW Statistics 18 (SPSS).

Mediante la integración de la información, se identificaron dos grupos o facies principales (ver figura 9). En la facie 1 se agruparon 27 muestras y en la 2, sólo 12, con sus respectivos subgrupos (4), que fue hasta donde se llevó la descripción que

Figura 8

Correlación de indicadores hidrogeoquímicos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) que permiten diferenciar los flujos locales, intermedios y regionales en la zona de Cuajinicuilapa, Guerrero



Fuente: Mifflin, 1968.

hacemos y que se indica su ubicación física en la parte superior del dendrograma (ver figuras 9a, 9b, 9c y 9d).

En la figura 9a se aprecia que las muestras se ubican en toda la zona del acuífero aluvial, lo cual pudiera indicar que se encuentran asociadas al desarrollo de los escurrimientos en la planicie aluvial; las agrupadas en la figura 9b se asocian con la llegada del río Quetzala y únicamente una de ellas se ubica en el extremo opuesto, por donde llega el río Santa Catarina, así que pudiera ser una característica del agua que discurre de forma superficial y se infiltra de inmediato a la planicie aluvial; en la 9c, la distribución de las muestras se presenta con la llegada de los ríos Santa Catarina y Cortijo (oriente del área); la 9d representa los pozos que se distribuyen en la zona centro-norte, prácticamente en la cabecera del acuífero aluvial y que pudiera indicar

zonas de recarga con una mayor concentración de algunos componentes químicos.

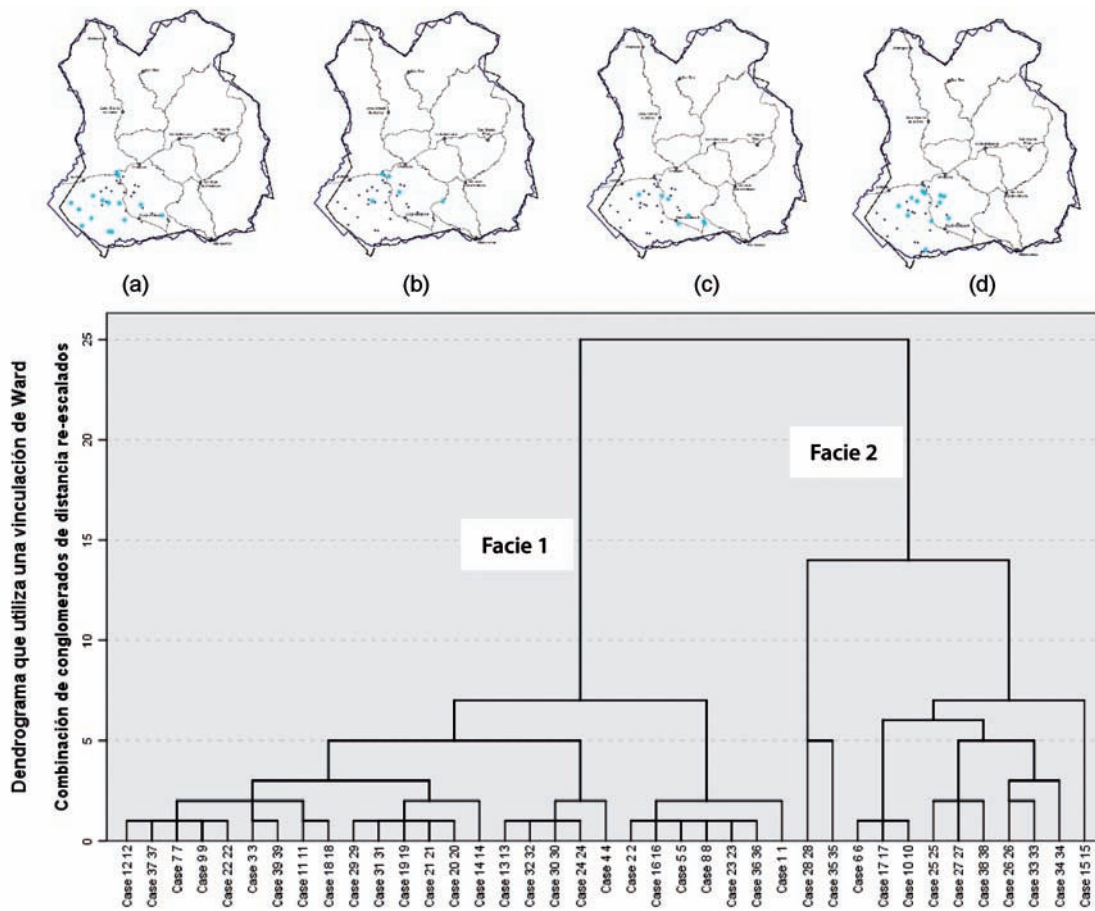
Conclusiones

El acuífero de Cuajinicuilapa ubicado en la Costa Chica del estado de Guerrero recibe su recarga sobre todo a través de las corrientes superficiales que drenan los valles debido a su condición de libre, por lo que el mantenimiento de su buena calidad fisicoquímica redundará en la calidad del agua subterránea.

El modelo geohidrológico conceptual y el graficado de índices hidrogeoquímicos indican la presencia de flujos locales, intermedios y/o regionales que, aunque no son determinantes en la calidad fisicoquímica del agua subterránea debido a procesos

Figura 9

Dendrograma con la representación de sus respectivas facies y ubicación de aprovechamientos muestreados en el acuífero de Cuajinicuilapa, Guerrero



de mezclas, se hace necesaria su identificación a mayor detalle para prever su comportamiento dentro del acuífero.

Es de suma importancia identificar en los estudios hidrológicos de aguas subterráneas el papel y extensión de las zonas hiporreicas, ya que éstas pudieran influir en la calidad fisicoquímica del agua subterránea y, de ser posible, que ambas sean manejadas como un mismo sistema hidrogeológico con el fin de proteger los acuíferos y preservar estas zonas debido a su importancia biológica.

La implementación de técnicas estadísticas en la identificación de la evolución fisicoquímica del

agua subterránea cumplió con las expectativas de apoyo para la definición de sus orígenes o etapas de circulación, por lo que ésta se pudiera implementar para dar mayor uso a los datos contenidos en el SIG levantado por el INEGI.

Por último, se hace necesario concientizar a las autoridades de las localidades que se ubican dentro de la cuenca hidrográfica para que se comprometan al confinamiento o tratamiento de las aguas residuales domiciliarias con el propósito de que no sean descargadas de manera directa a los escurrimientos superficiales en detrimento de las comunidades que se encuentran en la parte baja o a la salida de la cuenca.

Referencias

- Brito-Castillo, L. et al. "Groundwater differentiation of the aquifer in the Vizcaino Biosphere Reserve, Baja California Peninsula, Mexico", en: *Geofísica Internacional*. 49 (4), 167-179, 2010.
- CONAGUA. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuajinicuilapa, estado de Guerrero*. 2002.
- _____. *Estudio de actualización de mediciones piezométricas en los acuíferos de Tehuantepec, Nochixtlán y Cuajinicuilapa del estado de Guerrero*. COPEI Ingeniería, 2003, 128 p.
- Dahm, C. N. et al. "Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters", en: *Freshwater Biology*. 40, 427-451, 1998.
- Fox, G. A. & D. S. Durnford. "Unsaturated hyporheic zone flow in stream/aquifer conjunctive systems", en: *Advances in Water Resources*. 26: 989-1000, 2003.
- González, A. Fernando. *Guía rápida del programa SPSS ver. 13.0 a 15.0*. Curso Intensivo de Posgrado. UACH, México, 2010.
- Hem, J. D. "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water", en: *US. Geological Survey Water-Supply*. Paper 2254, 1985.
- Hayashi, M. and D. O. Rosenberry. "Effects of groundwater exchange on the hydrology and ecology of surface water", en: *Japanese Journal of Groundwater Hydrology*. 43, 327-341. Japanese Association of Groundwater Hydrology, 2001.
- Hergt, T. et al. *Análisis multivariado en la definición de sistemas de flujo de agua subterránea en San Luis Potosí, México*. 2007.
- Hernández, H. et al. "Determinación de las características del agua subterránea del graben de Aguascalientes, usando análisis multivariado", ponencia presentada en: *Groundwater flow understanding from local to regional scales*. XXXIII Congress IAH & 7º Congress ALHSUD, 2004.
- INEGI. *Sistema de clasificación y levantamiento fisiográfico, escala 1:1 000 000*. Aguascalientes, México, INEGI, 2001, 21 pp.
- _____. *Conjunto de datos geológicos Chilpancingo, E14-08, escala 1:250 000*. En formatos impreso y digital. México, INEGI, 2010.
- Mifflin, M. D. "Delineation of groundwater flow systems in Nevada", en: Report Series H-W. No. 4, p. 111, *Desert Research Institute Technical*, 1968.
- _____. "Region 5, Great Basin", en: Back, W. et al. (eds.). *Hydrogeology*. Geological Society of America. 69-78, 1988.
- Neri Flores, Iris. *Identificación de zonas vulnerables a intrusión salina en una zona costera de Veracruz*. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica, 2007, 148 p.
- Rajesh Reghunath, T. R. Sreedhara Murthy y B. R. Raghavan. "The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India", en: *Water Research*. 36, 2437-2442, 2002.
- Salman, S. R., Abu Ruka'h. "Multivariate and principal component statistical analysis of contamination in urban and agricultural soils from north Jordan", en: *Environmental Geology*. 38 (3), p. 265-270, 1999.
- SARH. *Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Cuajinicuilapa, estado de Guerrero*. Elaborado bajo contrato por Lesser y Asociados, SA de CV, 1984.
- Simeonov, V. et al. "Assesment of the surface water quality in Northern Greece", en: *Water Research*. 37, 4119-4124, 2003.
- Sophocleous, M. "Interactions between groundwater and surface water: the state of the science", en: *Hydrogeology Journal*. 10:52-67, 2002.
- Tóth, J. "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones", en: *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 111-4, 9-26, 2000.
- Villanueva Martínez, Manuel y Alfredo Iglesias López. *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Instituto Geológico y Minero de España, 1984, 313 p.
- Winter, T. C. et al. "Ground water and surface water. A single resource", en: *U.S. Geological Survey*. Circular 1139, 1998.
- Williams, D. D. "Nutrient and flow vector dynamics at the hyporheic/groundwater interface and their effects on the interstitial fauna", en: *Hydrobiologia*. 251:185-198, 1993.
- Wondzell, S. M. and F. J. Swanson. "Floods, channel change and the hyporheic zone", en: *Water Resources Research*. Vol. 35, No. 2, p. 555-567, 1999.