Distribución de sales y arsénico en el acuífero de La Paz BCS, México

Distribution of salts and arsenic in the aquifer of La Paz BCS, Mexico

RESUMEN

Se instaló una red de monitoreo de pozos en el acuífero¹ de La Paz para el muestreo de agua; esto incluye los usos del agua potable, agricultura, ganadería y servicios. Se midió la concentración de sales obteniéndose valores que van de 260 a 5300 mg/l, mientras que el límite para el consumo humano señalado por la

Recursos Naturales y Sociedad, 2016. Vol. 2 (2): 56-75.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2016.02.02.02.0004>

Cruz-Falcón Arturo¹, Murillo-Jiménez Janette Magalli² Troyo-Diéguez Enrique¹ y Nava-Sánchez Enrique Hiparco²

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B. C. S. 23096, México.

² Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) - IPN, La Paz BCS, México.

Organización Mundial de la Salud es de 1000 mg/l, y el establecido por la Norma Oficial Mexicana² para sólidos totales disueltos (STD)³ es también de 1000 mg/l. Además, se analizaron los elementos calcio, magnesio, sodio y potasio (cationes), y otros como carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros (aniones) de 14 pozos situados paralelos a la línea de costa y en la parte central del acuífero¹, para determinar el tipo de agua utilizando un diagrama de Piper⁴. Se encontraron dos familias principales de agua: clorurada cálcica y clorurada sódica.

Sodio y cloruros encontrados en altas concentraciones indican una afectación de los pozos cercanos a la costa debido a la intrusión marina⁵. Así mismo, el calcio en concentraciones elevadas sugiere la existencia de materiales o capas de sedimentos⁶ de origen químico-orgánico en la estratigrafía⁷ del acuífero¹, a través de las cuales circula el agua subterránea.

Se delimitaron dos zonas afectadas por la intrusión marina⁵, una de 6 km entre los ejidos

Chametla y El Centenario; y la otra de 5.5 km hacia el este y sureste del ejido Chametla. Esta contaminación del acuífero¹ por agua de mar puede estar relacionada a un bombeo excesivo de algunos pozos agrícolas.

De los 30 pozos de agua potable que abastecen a la ciudad de La Paz, solo en cuatro se encontraron concentraciones de sales por encima de los 1000 mg/l. De ellos, tres se usaban antes para riego agrícola. Esta relativa baja concentración de sales en los pozos que abastecen a la ciudad de La Paz se atribuye a la continua recarga⁸ y circulación del agua subterránea debido a una buena permeabilidad⁹ entre los sedimentos⁶ de esta zona.

De 20 pozos muestreados para análisis de arsénico¹⁰, en tres se detectaron concentraciones que rebasan lo establecido en la Norma Oficial Mexicana², no obstante se ubican en un área donde no se ha desarrollado actividad minera, solo escasa agricultura. En este caso la presencia de arsénico¹⁰ en el agua se atribuye a condiciones naturales debido al tipo de roca, sedimentos⁶ y fallas geológicas¹¹

en la zona. Una causa puede ser debido al hidrotermalismo¹² que ocurre a profundidad en fallas geológicas¹¹ cercanas; y la otra, por el lavado de rocas sedimentarias¹³ marinas que contienen fosfatos¹⁴, producido por los escurrimientos superficiales y la circulación de agua subterránea.

Nota: la definición de palabras o conceptos que están marcadas en el texto con un número o índice superior, se encuentran al final del escrito.

Palabras clave

Acuífero de La Paz, calidad de agua subterránea, arsénico en agua subterránea, arsénico en pozos de agua, cuenca de La Paz.

ABSTRACT

A monitoring network of water wells was installed in the aquifer of La Paz for water sampling, including the use of potable water, agriculture, livestock, and services. Salt concentration was measured with values ranging from 260 to 5300 mg/l while the limit allowed for human consumption set by the World Health Organization is of 1000 mg/l, and the one established by the Official

Mexican Standard for total dissolved solids (TDS) is also 1000 mg/L. In addition, elements such as calcium, magnesium, sodium, and potassium (cations), and others such as carbonates, bicarbonates, sulphates, and chlorides (anions) of 14 wells located parallel to the coastline and in the central part of the aquifer were analyzed to determine the type of water with a Piper diagram, with which two main water families were found, calcium chloride and sodium chloride.

Sodium and chlorides found in high concentrations indicates an affectation of the near shore water wells due to seawater intrusion, and high concentrations of calcium suggest the presence of materials or sedimentary deposits of chemical-organic origin that compose the stratigraphy of the aquifer through which underground water flows.

Two zones affected by seawater intrusion were delimited, one 6 km from the coast between the common lands Ejido Chametla and Ejido El Centenario; and the other one 5.5 km from the coast eastward and southeastward

from Ejido Chametla. This contamination by seawater may be due to over pumping of some water wells for agriculture.

Of 30 potable water wells that supply water for the city of La Paz, only four were found with salt concentration above 1000 mg/L. Of these four, three wells were formerly used for agricultural irrigation. This relatively low salt concentration in the wells that supply water for the city of La Paz is attributed to a continuous recharge and a constant flow of groundwater due to a good permeability of the sediments in this area.

Of 20 water wells sampled for arsenic analysis, three exceeded concentration of the Mexican Official Standard despite being located in an area where no mining activity has been developed, only little agriculture, such that the presence of arsenic in water is attributed to natural conditions due to the type of rock, sediments, and geological faults found around the area. A likely cause of arsenic concentrations may be due to hydrothermalism of the nearby geological faults or by

washing and leaching of marine sedimentary rocks containing phosphates because of surface runoff and groundwater flow.

Key words

Aquifer of La Paz, groundwater quality, arsenic in groundwater, arsenic in water wells, basin of La Paz.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe un problema serio de escasez de agua, contaminación y deterioro de los acuíferos¹ que abastecen de agua a las poblaciones. El acuífero¹ de La Paz no es la excepción y presenta sus propios problemas.

Durante las últimas décadas este acuífero¹ se ha visto afectado por la sobreexplotación debido a que se extraen mayores volúmenes de agua, a través del bombeo de pozos, que lo que provee la recarga⁸ natural debida a las lluvias. Lo anterior ha generado contaminación por intrusión marina⁵ por tratarse de un acuífero¹ costero (CNA, 1997; CIGSA, 2001; Cruz-Falcón et al., 2013).

La escasez de agua ha sido el

factor limitante para el desarrollo en la región (CCA, CONAGUA, FMEA, 2005) y el mayor reto de La ciudad de La Paz es la provisión de agua para sus residentes en suficiente cantidad y calidad (Steinitz et al., 2006) ya que debido al crecimiento actual de la población de la ciudad de La Paz a una tasa promedio mayor al 5% anual (Rivera-Rosas, 2012) la disponibilidad¹⁵ de agua ha disminuido notablemente al no existir otras fuentes de abastecimiento, lo que conlleva al deterioro de su calidad (CONAGUA, 2010).

Un acuífero¹ no solamente puede deteriorarse por la sobreexplotación, sino también por la contaminación que tiene como resultado el uso de los fertilizantes agrícolas, las fugas de aguas negras y los desechos industriales, entre otros (Henry, 1959). La mayoría de los problemas de salud relacionados con el agua, se deben principalmente a la contaminación por microorganismos (bacterias, virus, protozoos u otros organismos); no obstante, existen problemas de salud que pueden producirse por la contaminación química del agua de consumo, producto de procesos

naturales o los realizados por el hombre (OMS, 2006).

La composición química del agua subterránea es muy variable, depende de la ubicación del pozo, su profundidad y del tipo de roca a su alrededor. El agua subterránea contenida en los acuíferos¹ es producto de la lluvia que se infiltra a través del suelo o de la roca, por lo que su composición se altera debido a procesos geoquímicos de acuerdo a la constitución y contenido de minerales de las capas por donde circula.

Algunas rocas y sedimentos⁶ que conforman las cuencas hidrológicas¹⁶ en Baja California Sur contienen de manera natural elementos como cobre, níquel, mercurio, cadmio y arsénico¹⁰, los cuales, en algunas áreas han sido enriquecidos en el ambiente por procesos mineros en la obtención de oro (Carrillo-Chávez, 1996), por lo que el uso de agua contaminada por estos elementos puede representar riesgo a la salud. Por tanto, ciertas actividades realizadas por el hombre pueden afectar la calidad del agua, debido a que modifican notablemente los niveles de algunos parámetros físicos y químicos.

ÁREA DE ESTUDIO

El acuífero¹ de La Paz se asienta en el subsuelo de la ciudad de La Paz y alrededores, localizado en la parte sur de la península de Baja California, México (Figura 1). Se clasifica como un acuífero libre¹⁷ (CIGSA, 2001; Escolero y Torres, 2007; CONAGUA, 2009) compuesto debido a material detrítico constituido por sedimentos⁶ aluviales¹⁸ muy permeables, arena, limo y arcilla, rocas volcánicas fracturadas de baja permeabilidad⁹. Todas estas capas descansan sobre un basamento¹⁹ formado por rocas ígneas²⁰ y metamórficas²¹ (CNA, 1997). Este acuífero¹ se define también como un acuífero¹ costero porque limita con la línea de costa, situación que lo hace vulnerable a la contaminación por intrusión marina⁵ (Cruz-Falcón et al., 2013).

El acuífero¹ de La Paz abastece a la ciudad de La Paz, capital del estado, la cual demanda aproximadamente dos terceras partes del agua subterránea que se extrae, y atiende la zona agrícola. Actualmente el agua del acuífero¹

está sobre concesionada y se encuentra en condiciones de sobreexplotación debido a que las extracciones anuales han sobrepasado la disponibilidad¹⁵ total del agua. Algunos usuarios, entre ellos el Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOMSAPAS) de La Paz, utiliza volúmenes mayores a los de la dotación por

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir del trabajo de prospección y de las características de los pozos, se elaboró un mapa base (Figura 2). El mapa incluye un total de 61 pozos: 30 de agua potable, 28 de uso agrícola, dos pozos pecuarios y uno de servicios.

Figura 1. Localización del acuífero de La Paz.

habitante (CONAGUA, 2009), posiblemente debido a la enorme cantidad de fugas en la red de distribución de agua potable y falta de medidores en las tomas domiciliarias, lo que contribuye a un enorme desperdicio.

Distribución de sales

La salinidad es la concentración total de sales disueltas en el agua, principalmente con elementos como calcio, magnesio, sodio y potasio (cationes), y otros como carbonato, bicarbonato, sulfato y cloruro

(aniones). El calcio se une fácilmente con el carbonato para formar carbonato de calcio (CaCO_3) que es el principal factor de la dureza del agua y causante de incrustaciones en las tuberías (USGS, 1999). En general, la sal más abundante en el agua es el cloruro de sodio (NaCl) o sal común. El agua de buena calidad

la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para conocer la calidad del agua, así como para delimitar la cuña de intrusión marina⁵ en acuíferos¹ costeros. El límite para consumo humano establecido por la Norma Oficial Mexicana² es de 1000 mg/L.

La concentración de sales en el acuífero¹ de La Paz

Figura 2. Red de monitoreo de pozos del acuífero de La Paz. Se incluyen 30 pozos de agua potable, 28 agrícolas, dos pecuarios y uno de servicios.

o para consumo humano no debe contener más de 1000 mg/L de sales disueltas (OMS, 2006).

Los sólidos totales disueltos³ son una medida de la cantidad de materia, sustancias, elementos y sales disueltas en el agua. Se utilizan comúnmente para determinar la concentración de sales en el agua subterránea. La medición de este parámetro, lo utiliza

es menor en la zona donde se ubican los pozos de agua potable, y mayor en los pozos, principalmente agrícolas, cercanos a la costa, por lo que se delimitaron dos zonas afectadas por la intrusión marina⁵: una de aproximadamente 6 km de la costa, hacia el sur, entre los ejidos Chametla y El Centenario; y otra de 5.5 km de la costa hacia el este y sureste del ejido Chametla

(Figura 3), lo cual puede deberse a un continuo bombeo de algunos pozos agrícolas.

Se analizaron las concentraciones de aniones y

%, predomina en 12 de los pozos; el bicarbonato con un 22 %, destaca en solo dos pozos; y los sulfatos con el 11 % son los que presentan las más

Figura 3. Contornos de igual salinidad, que muestran la intrusión marina al acuífero de La Paz, en 2013.

caciones de 14 pozos cercanos a la línea de costa y en la parte central del acuífero¹, con el objetivo de determinar el tipo de agua. Para lo que se elaboró un diagrama de Piper⁴ (Figura 4) a partir de la relación entre los aniones y cationes principales (Freeze y Cherry, 1979). Se distinguieron cinco familias de agua (Figura 5), donde destacan la clorurada-cálcica y clorurada-sódica.

El anión predominante en concentración relativa es el cloruro con un porcentaje promedio de 67

bajas concentraciones. El catión mayoritario en concentración relativa es el calcio, con un porcentaje promedio de 43%, predomina en nueve pozos; el sodio con 43% destaca en cinco pozos; y el magnesio con 14% es el que presenta las concentraciones más bajas. Estos porcentajes sugieren un agua del tipo clorurada-cálcica en siete de los pozos (Pino Payas, 10, 145, 243, 378-R, 408 y 422), clorurada-sódica en cuatro pozos (Ardilla 2, 134, 217-R y 368), clorurada cálcica-sódica en el pozo 151, bicarbonatada-sódica

en el pozo 197-A, y bicarbonatada cálcica-sódica en el pozo 6 (Figura 5).

Las características químicas del agua subterránea se derivan de la disolución mineralógica de las rocas y sedimentos⁶ a través de los cuales circula (Freeze y Cherry, 1979). De ahí que la presencia de cloruros en el agua subterránea, en concentraciones relativamente mayores que sulfatos y bicarbonatos, puede deberse a la disolución de los minerales

atrapados entre los materiales que conforman el acuífero¹, pero no existe documentación sobre esto. La otra posibilidad es debido a que como el cloruro es el principal compuesto disuelto en el agua de mar, es posible que esté relacionado con la intrusión marina⁵.

En la zona costera del acuífero¹ de La Paz se lleva a cabo el proceso de intrusión marina⁵ debido a la sobreexplotación, que estaría representado por el tipo de agua clorurada-sódica. El tipo de agua clorurada-cálcica, también encontrado, supone que el calcio puede provenir del lavado de material de origen evaporítico (químico-orgánico) de las capas de roca o sedimento⁶ que forman el acuífero¹.

Las áreas de recarga⁸ del acuífero¹ de La Paz se localizan hacia el este y sureste de la cuenca²³ de La Paz (SARH-UNAM-UABCS, 1986; CIGSA, 2001; IPN-CICIMAR/CIBNOR/UABCS, 2002) entre las sierras Las Cruces y El Novillo, donde el agua de lluvia se infiltra a través del suelo, de las grietas, fracturas y fallas geológicas¹¹. El agua infiltrada

Figura 4. Diagrama de Piper para la determinación del tipo de agua de 14 muestras de agua de pozo

que conforman los materiales del acuífero¹, a la contaminación causada por el hombre, o a la intrusión marina⁵.

Debido a la predominancia de las familias clorurada-cálcica en siete de los pozos y clorurada-sódica en cuatro de ellos, se cree que el agua subterránea en la zona de mezcla se derive de una combinación de aguas de recarga⁸ natural por flujo subterráneo con el agua de mar.

Los minerales como apatita²², sodalita, micas y hornblenda, que forman las rocas ígneas²¹ y metamórficas²¹ localizadas en las partes altas de la cuenca²³ y que pudieran ser la fuente potencial de cloruros, se caracterizan por una baja solubilidad, por lo que la posibilidad de que el cloruro provenga de ahí es casi nula. Lo más probable es que se derive de capas con cloruro de sodio (sal común) y minerales afines que hayan quedado

se transporta lentamente por el subsuelo entre las capas de roca y sedimentos⁶ hacia las partes bajas de la cuenca²³ para recargar el acuífero¹ (Cruz-Falcón et al., 2011). Una posibilidad puede ser, que de acuerdo

CIBNOR/UABCS, 2002). Además se sabe que existen capas de caliche²⁴ que afloran en diferentes partes de la cuenca²³ de La Paz, el cual es un depósito endurecido de carbonato de calcio, común en zonas

Figura 5. Familias de agua de 14 pozos del acuífero de La Paz. Se incluyen los pozos 243 y 408, que no están considerados en la red de monitoreo.

a la dirección predominante de circulación del agua subterránea de sur a norte que descarga en la laguna de La Paz, se transporten hacia el acuífero¹ elementos que se lavan de algunas capas de arenisca-conglomerado intercalada con limolitas, arcillas y capas fosilíferas cementadas por carbonato de calcio (CaCO_3) (SARH-UNAM-UABCS, 1986; Álvarez-Arellano et al., 1997; CNA, 1997; CIGSA, 2001; IPN-CICIMAR/

áridas o semiáridas (Diccionarios Rioduero, 1974), pero no está documentado.

Distribución de arsénico

Se tomaron 20 muestras de agua de pozo para análisis de arsénico¹⁰ (Figura 6). Los resultados indican que en dos pozos de agua potable se detectaron concentraciones por arriba de la Norma

Oficial Mexicana² (NOM-127-SSA1-1994): 0.0398 mg/l en el pozo Ardilla 1, y 0.0458 mg/l en el pozo Ardilla 2. En el pozo agrícola 368 se encontró una concentración de 0.0225 mg/l, y en otros dos pozos agrícolas (252 y 384) concentraciones de 0.0067 y 0.0159 mg/l respectivamente. Estos pozos se encuentran en la porción noroeste del acuífero¹, cerca de los ejidos El Centenario y Chametla (Figura 6).

Los pozos con arsénico¹⁰ en concentraciones cercanas y por arriba de los 0.025 mg/l, que es el límite establecido por la Norma Oficial Mexicana² se encuentran donde no hay un registro histórico de alguna actividad minera, solamente poca agricultura, por lo que se desconoce su origen. Es probable que la fuente de este elemento sea de forma natural debido al tipo de roca y sedimentos⁶ alrededor del

Figura 6. Distribución de la concentración de arsénico en el agua de pozo del acuífero de La Paz. La banda de color rosa muestra la zona donde las concentraciones de arsénico rebasan el límite permisible de 0.025 mg/l, establecido por la Norma Oficial Mexicana.

El resultado de contenido de arsénico¹⁰ en los demás pozos que se muestrearon en otras partes del acuífero¹ es despreciable, inferior a 0.008 mg/l (Figura 6).

área. Por tanto, la procedencia de arsénico¹⁰ en esta zona del acuífero¹ se puede atribuir a dos causas principales, una de ellas sugiere que es debido al hidrotermalismo¹² que ocurre a profundidad en las

fallas geológicas¹¹ cercanas, como la de El Carrizal (INEGI, 1983; Álvarez-Arellano et al., 1997; Cruz-Falcón et al., 2010; Umhoefer et al., 2014) y El Centenario (Figura 7), que se consideran activas debido a algunos

desplazamientos inferidos (Umhoefer et al., 2014) y actividad sísmica registrada en la zona (Munguía-Orozco et al., 1997, Fletcher y Munguía, 2000).

La otra causa propone que el arsénico¹⁰ es

Figura 7. Localización de fallas geológicas: falla El Carrizal (fECa), falla Colinas de Garambullo (fCG), falla El Centenario (fECe), y falla La Paz (fLP). Modificado de Umhoefer et al. (2014). Se muestran los escurrimientos superficiales (líneas azules), y los pozos con contenido de arsénico (puntos azules): Ardilla 1 (pA1), Ardilla 2 (pA2), 368 (p368) y 384 (p384).

producto del lavado de rocas sedimentarias¹³ marinas con contenido de fosfatos¹⁴, o nódulos fosfáticos, que probablemente se encuentran mezclados con arenisca y conglomerado al

de la Formación²⁵, se compone de lutitas laminadas tobáceas, fosfatadas, síliceas, con diatomeas; limos y areniscas parcialmente fosfatados; conglomerados, tobas y fosforita²⁷ granular (Fischer et al.,

pozo.

Choumiline et al. (2006) realizó un estudio para identificar las principales fuentes de aporte de los depósitos de sedimentos⁶ en la laguna de La Paz (Figura 7).

Figura 8. Localidades donde aflora la Formación El Cien (puntos rojos). Tomado de Fischer et al. (1995). Se muestran algunos escurrimientos superficiales (líneas azules) donde se ha encontrado arsénico en los sedimentos: arroyo La Ardilla (aLA), arroyo El Palo Parado (aEPP), arroyo El Quelele (aEQ), y arroyo El Cajete (aEC); así como los pozos con contenido de arsénico (puntos azules): Ardilla 1 (pA1), Ardilla 2 (pA2), 368 (p368) y 384 (p384).

oeste y noroeste de la zona. La Formación²⁵ El Cien aflora en El Aguajito, al oeste, cerca del océano Pacífico; en el km 100 de la carretera al norte; y en San Juan de La Costa, 50 km al norte (Figura 8). El Miembro²⁶ San Juan, que es la parte basal

1995). Si está presente cerca de la zona alguno de estos elementos fosfatados, el transporte o lavado de estos materiales debido a los escurrimientos superficiales y la circulación de agua subterránea a su través, pudiera ser la fuente de arsénico¹⁰ presente en el agua de

Encontró que en la zona noroeste de la laguna existe una abundancia relativa de minerales pesados, entre ellos arsénico¹⁰, de lo cual deduce que son transportados por algunos arroyos, principalmente el arroyo La Ardilla, que atraviesa la parte norte del ejido El Centenario

y la zona de El Comitán, cruzando a su paso donde se ubican los pozos Ardilla 1 y Ardilla 2 (Figura 7).

La Carta Geoquímica por Arsénico¹⁰ (La Paz G-12-10-11) escala 1:250,000, del Servicio Geológico Mexicano (1999), reporta concentraciones de aproximadamente 18.5 a 19.7 ppm (partes por millón) de arsénico¹⁰ en los sedimentos⁶ del arroyo La Ardilla. Y hacia el noroeste, en los arroyos El Palo Parado, El Quelele y El Cajete, que descargan en la Bahía de La Paz (Figura 8), valores por arriba de los 18.5 hasta 29.7 ppm.

AGRADECIMIENTOS

A la Sociedad de Historia Natural Niparáj, por el apoyo a través del convenio con CIBNOR, del proyecto: Niparáj - Monitoreo de Pozos del acuífero de La Paz (2013). Al M. C. Álvaro González Michel, por su apoyo en el trabajo de campo para la medición de parámetros, toma de muestras y sondeo de pozos. A Juan Vega Mayagoitia, por su apoyo en la logística y trabajo de campo. A René Gaxiola Márquez y Francisco Aguillón León, por la construcción de la sonda eléctrica y pruebas de funcionamiento en algunos pozos. Los Autores agradecemos al Lic. Gerardo Hernández el diseño gráfico editorial y a la Ms.C. Diana Dorantes la revisión del Idioma Inglés del Abstract.

LITERATURA CITADA

Álvarez-Arellano A.D., Rojas S. H. y Prieto M.J.J., 1997. *Geología de la Bahía de La Paz y Áreas Adyacentes*. En: Urbán R.J. y Ramírez R. M., 1997. La Bahía de La Paz, Investigación y Conservación. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. pp. 13-29.

Carrillo-Chavez A., 1996. *Environmental geochemistry of the San Antonio-El Triunfo mining area, southernmost Baja California Peninsula Mexico*. Ph. D. Thesis. Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA, 186 pp.

CCA, CONAGUA, FMEA (Consejo Consultivo del Agua A.C., Comisión Nacional del Agua, Fundación Mexicana para la Educación Ambiental, A.C.), 2005. *Documento base para discusión caso de estudio manejo sustentable del agua en la región de La Paz BCS*. 54 pp.

Choumiline K., Godínez-Orta L., Nikolaeva N., Derkachev A. y Evgueni Shumilin E., 2006. *Evaluation of contribution sources for the sediments of the La Paz Lagoon, based on statistical treatment of the mineralogy of their heavy fraction and surrounding rock and drainage basin characteristics*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 61 (1): 97-109.

CIGSA (Consultores en Ingeniería Geofísica) S.A. de C. V., 2001. *Estudio de Caracterización y Modelación de la intrusión Marina en el acuífero de La Paz B. C. S.* Contrato CNA, GAS-013-PR01. 284 pp.

CNA (Comisión Nacional del Agua), 1997. *Censo de Captaciones de Aguas Subterráneas y Colección de datos Geohidrológicos en la zona La Paz-El Carrizal, B.C.S.* Informe final. Estudio realizado por ADI CONSTRUCCIONES, S.A. DE C.V., Contrato No. GAS-026-PR097. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. 173 pp.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2009.

- Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea, Acuífero (0324) La Paz, Estado de Baja California Sur.* Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de Agosto de 2009. 17 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2010. *Manejo integrado de las aguas subterráneas en el acuífero La Paz, Baja California Sur.* Proceso de planeación. Organismo de cuenca península de Baja California, Dirección local Baja California Sur, Subdirección de asistencia técnica operativa. La Paz BCS. Tomo I, 211 pp.
- Cruz-Falcón A., Vázquez-González R., Ramírez-Hernández J., Salinas-González F., Nava-Sánchez E. y Troyo-Diéguez E., 2010. *Depth estimation to the crystalline basement in the valley of La Paz, Baja California Sur, México.* Geofísica Internacional 49 (4): 213-224.
- Cruz-Falcón A., Vázquez-González R., Ramírez-Hernández J., Nava-Sánchez E.H., Troyo-Diéguez E., Rivera-Rosas J. y Vega-Mayagoitia J.E., 2011. *Precipitación y Recarga en la Cuenca de La Paz, BCS, México.* Revista Universidad y Ciencia, 27 (3): 251-263.
- Cruz-Falcón A., Ramírez-Hernández J., Vázquez-González R., Nava-Sánchez E.H., Troyo D.E., y Fraga-Palomino H.C., 2013. *Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero de La Paz, BCS, México.* Universidad y Ciencia, 29(1): 87-100.
- Diccionarios Rioduero, 1974. Geología y Mineralogía. Ediciones Rioduero, de EDICA, S.A., Madrid, 1974.
- Escolero O. y Torres-Onofre S., 2007. *Análisis de la intrusión de agua de mar en el acuífero de La Paz (México).* Boletín Geológico y Minero, 118 (Núm. Especial): 637-648.
- Fischer R., Galli-Olivier C., Gidde A., y Schwenicke T., 1995. *The El Cien Formation of southern Baja California, Mexico: Stratigraphic precisions.* Newsletters on Stratigraphy 32 (3): 137-161.
- Fletcher, J. M. y L. Munguía, 2000. *Active Continental Rifting in Southern Baja California, México: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the gulf of California.* Tectonics 19 (6): 1107-1123.
- Freeze A.R. y Cherry J.A., 1979. *Groundwater.* Prentice-Hall, Inc. New Jersey, U.S.A. 604 pp.
- Henry, H. R., 1959. *Salt intrusion into fresh-water aquifer.* Journal of Geophysic Research. 64 (11): 1911-1919.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 1983. *Cartas geológicas F12-3-5-6 y G12-10-11, escala 1:250,000.*
- IPN-CICIMAR/CIBNOR/UABCS (Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas / Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste / Universidad Autónoma de Baja California Sur), 2002. *Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz, B.C.S.* Informe preliminar. Abril, 2002. 466 pp.
- Munguía-Orozco L., T. Valdéz-López, M. Navarro-Sánchez, A. Cruz-Falcón y S. Mayer-Geraldo, 1997. *Red Sísmica Temporal de La Paz: Boletín de Información Sísmica (Septiembre-Octubre de 1996).* GEOS (Unión Geofísica Mexicana), 17 (1):

23-27.

NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, 1994. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. 71 pp. En: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>. (consultado en diciembre de 2013).

OMS (Organización Mundial de la Salud), 2006. *Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice*. Vol. 1: *Recomendaciones*. Tercera edición. 398 pp.

Rivera-Rosas J., 2012. *Efectos socioambientales en la cuenca costera de La Paz, BCS., México, inducidos por el cambio climático*. Tesis de Maestría, UABCS. 135 pp.

SARH-UNAM-UABCS, 1986. *Estudio Geohidrológico complementario de las cuencas La Paz-El Carrizal, para proporcionar agua en bloque a la ciudad de La Paz, Baja California Sur*. 334 pp.

Servicio Geológico Mexicano (1999). *Carta Geoquímica por Arsénico La Paz G-12-10-11, Baja California Sur, escala 1:250,000*. En: https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geoquimica/23_G12-10-11_as.pdf. (consultado en julio de 2016).

Steinitz, C., R. Faris, M. Flaxman, J. C. Vargas-Moreno, T. Canfield, O. Arizpe, M. Angeles, M. Cariño, F. Santiago, T. Maddock III, C. Dragoo, K. Baird, y L. Godínez, 2006. *Alternative futures for the region of La Paz, Baja California Sur, Mexico*. Harvard University, Cambridge, MA USA 02138. 37 pp.

Umhoefer P. J., S. J. Maloney, B. Buchanan, J. R.

Arrowsmith, G. Martinez-Gutiérrez, G. Kent, N. Driscoll, A. Harding, D. Kaufman y T. Rittenour, 2014. *Late Quaternary faulting history of the Carrizal and related faults, La Paz region, Baja California Sur, Mexico*. Geosphere; doi:10.1130/GES00924.1

USGS (U.S. Geological Survey), 1999. *Ground Water. U.S. Geological Survey General Interest Publication. Quality of Ground Water*. Reston, Virginia, revisión de 1999. En: <http://pubs.usgs.gov/gip/gw/index.html>. (consultado en febrero de 2010).

DEFINICIÓN DE PALABRAS Y CONCEPTOS INCLUIDOS EN EL TEXTO SEÑALADOS CON UN NÚMERO ÍNDICE SUPERIOR

¹**Acuífero (s)**, es una formación geológica en el subsuelo, capaz de almacenar o contener cantidades potenciales de agua que puede ser explotada a través del bombeo de pozos. El agua puede ser utilizada para diferentes necesidades o usos en una comunidad, o para riego agrícola. Si se respetan los volúmenes de explotación del acuífero se puede mantener un balance entre la recarga y extracción para conservarlo por tiempo indefinido.

²**Norma Oficial Mexicana**, es una reglamentación cuyo objetivo es regular y asegurar valores, cantidades y características mínimas o máximas. En el caso de calidad del agua, es una medida de la condición del agua en relación a estándares biológicos, físicos, químicos y radiológicos. Si el agua se encuentra por

arriba de éstos, puede ser en mayor o menor medida, perjudicial para el consumo humano. La NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”. Establece los límites máximos bacteriológicos, físico-químicos, compuestos orgánicos, metales pesados, etc., que debe contener el agua para consumo humano.

³Sólidos totales disueltos (STD), es una medida de la cantidad de materia, sustancias, elementos y sales disueltas en el agua. Comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua. Una concentración menor que 0.6 gramos por litro suele considerarse buena, pero una concentración alta (mayor de 1.5 gramos por litro) es inaceptable. Para considerar el agua como potable se ha fijado un valor máximo en la concentración de STD no mayor de 1000 mg/L.

⁴Diagrama de Piper, es un gráfico en forma de triángulo utilizado para representar la proporción de tres componentes o iones en el agua, en este caso, los porcentajes de calcio, magnesio y sodio, así como bicarbonatos, sulfatos y cloruros que están disueltos en el agua.

⁵Intrusión marina, es el fenómeno que se produce por la invasión del agua de mar a tierra en forma subterránea. Es común que esto ocurra en un acuífero costero o cercano al mar que se encuentre en

condiciones de sobreexplotación, en el que se extrae más agua de la que provee la recarga natural. Debido a la sobreexplotación ocurre un descenso del nivel freático, lo que trae como consecuencia la intrusión de agua de mar.

⁶Sedimento (s), es o son depósitos de origen detrítico (partículas), químico u orgánico, producto de la destrucción mecánica o de alteración física, química o biológica de las rocas.

⁷Estratigrafía, es una parte de la geología que se ocupa de la disposición y composición de los estratos o capas, así como de los fósiles que contienen.

⁸Recarga, es un proceso del ciclo hidrológico que consiste en la infiltración de agua de lluvia al subsuelo y su posterior incorporación, por flujo o circulación subterránea, al agua subterránea y los acuíferos.

⁹Permeabilidad, es la facilidad de movimiento, o el grado de conexión que existe entre los poros de una roca, que permite la circulación de agua a su través. Una buena permeabilidad de los materiales del subsuelo es importante para la recarga de un acuífero.

¹⁰Arsénico, es un elemento de la naturaleza extremadamente tóxico que pertenece al grupo de los semimetales. Debido a que se encuentra contenido en algunas rocas y minerales, si la roca o mineral se parte o fractura, ya sea en forma natural o por alguna actividad humana como la minería, puede ser lavado

y arrastrado por los escurrimientos superficiales o por el agua subterránea, pudiendo llegar al agua subterránea y los acuíferos.

¹¹**Falla (s) geológica (s)**, es la fractura de un cuerpo (roca o masa rocosa) sólido, donde ha ocurrido un desplazamiento. El desplazamiento de la falla puede ser vertical u horizontal.

¹²**Hidrotermalismo**, es un proceso geológico en el cual los sedimentos o rocas están afectadas por la circulación de fluidos a altas temperaturas y químicamente activos, comúnmente asociados a fallas geológicas. En las zonas de fallas es común la formación de sulfuros que constituyen la mayoría de las menas minerales donde se desprenden los metales más comunes, incluyendo algunos con contenido de arsénico como la niquelina, cobaltina, arsenopirita y skutterudita.

¹³**Roca (s) sedimentaria (s)**, son aquellas que se forman del material derivado de la desintegración de rocas preexistentes, causado por el intemperismo o meteorización (humedad, frío, calor). La roca madre puede ser ígnea, sedimentaria o metamórfica. Las partículas o clastos liberados, son transportadas por los agentes erosivos (corrientes de agua, viento) hasta donde se realiza su acumulación y posterior litificación para formar la roca. También pueden formarse rocas sedimentarias de origen químico, orgánico, o químico-orgánico, por lo que con frecuencia contiene fósiles. Ejemplos de rocas sedimentarias son las calizas, las areniscas y los conglomerados.

¹⁴**Fosfatos**, son rocas sedimentarias formadas de minerales fosfatados que se presentan en forma de granos, nódulos concrecionados o esferas carbonatadas (unión de partículas que forman una masa, como oolitos u nódulos de 0.5 a 2 mm), fósiles y fragmentos de esqueletos orgánicos. La apatita pertenece a un grupo de minerales fosfatados que puede tener contenidos relativamente altos de arsénico.

¹⁵**disponibilidad (de agua)**, es el volumen máximo de extracción sin afectar al acuífero y su volumen de recarga. Pero se refiere al volumen de agua excedente, o que está sin uso en un acuífero, separadamente de la extracción anual para suministro de los diferentes usos (agua potable, agrícola, pecuario, doméstico, servicios e industrial). La disponibilidad de agua también depende de la recarga anual, volumen y capacidad de almacenamiento del acuífero.

¹⁶**Cuenca (s) hidrológica (s)**, es desde el punto de vista físico una superficie en forma de depresión delimitada alrededor por las elevaciones del terreno o líneas divisorias conocidas como parteaguas, donde el agua de lluvia que cae es captada y escurre hacia un mismo lugar en las partes bajas o valles. En una cuenca hidrológica interviene y se interrelacionan el relieve, agua superficial, suelo, flora, fauna y otros recursos naturales, así como el agua subterránea y los acuíferos.

¹⁷**Acuífero libre**, es aquel acuífero cuyo límite superior está formado por una superficie libre, es decir, no está encapsulado entre capas de roca o sedimento. El nivel freático (nivel superior del agua subterránea o de un acuífero) varía de acuerdo a la recarga, explotación y la presión atmosférica.

¹⁸**Aluviales o aluvión**, se refiere al material detrítico o partículas de roca transportado por ríos o arroyos desde las partes altas de una cuenca, y depositado o acumulado en las llanuras o valles. Comúnmente se les conoce como depósitos aluviales, y están compuestos por grava, arena, limo y arcilla, en diferentes proporciones.

¹⁹**Basamento**, Es la “base” donde están acumulados o depositados todos los sedimentos en una cuenca. Normalmente está formado por roca ígnea o metamórfica antigua, que se encuentra en la base de una cobertura sedimentaria. Las rocas del basamento habitualmente poseen diferente densidad, velocidad acústica y propiedades magnéticas que las rocas que están por arriba.

²⁰**Roca (s) ígnea (s)**, se forman a partir del magma procedente del manto de la tierra que asciende a la superficie a través de la corteza, y se enfría. El magma puede salir a la superficie a través de los volcanes, formando rocas ígneas extrusivas como el basalto que se origina por la rápida solidificación del magma. Cuando el magma se enfría de forma lenta dentro de la corteza forma rocas ígneas intrusivas, como el granito.

²¹**Roca (s) metamórfica (s)**, su origen se refiere a la transformación de la estructura o la composición química o mineral de una roca por efectos de alta temperatura o presión. Su origen es muy diverso. La roca ‘madre’ de la que proviene puede ser de la transformación de una roca ígnea, una sedimentaria e incluso de otra roca metamórfica. Mediante el metamorfismo, se forma nueva estructura y nuevos minerales. Entre las rocas metamórficas merecen ser citadas los mármoles y los esquistos.

²²**Apatita**, mineral que químicamente es un fosfato de calcio que contiene cloro o flúor (hasta en un 96%) en forma de sales. Según sea la proporción de estos elementos, se denomine clorapatita o flúorapatita. También puede contener cierta cantidad de ácido silícico y en ocasiones hierro y manganeso. Su origen puede ser tanto geológico como biológico, en formaciones hidrotermales, magmáticas, metamorfismo de contacto o sedimentario, así como en depósitos sedimentarios de origen evaporítico. Las rocas fosfóricas o fosforita están constituidas principalmente por apatitas. En los depósitos se acompaña de algunos minerales entre los que destacan silicatos, óxidos, haluros, carbonatos y sulfuros. En este último grupo sobresale la arsenopirita, que contiene 46% de arsénico, 34.3% de hierro y 19.7% de azufre, de ahí que puede tener concentraciones relativamente altas de arsénico.

²³**Cuenca**, es una depresión en la superficie de la tierra (cuenca continental) o en el mar (cuenca

oceánica). En tierra también se puede considerar como un valle rodeado de elevaciones (cerros, sierras, montañas). Tomando en cuenta el ciclo hidrológico, se definen cuenca hidrográfica y cuenca hidrológica, en esta última se considera al agua subterránea y sus procesos.

²⁴**Caliche**, es un depósito o costra de carbonato de calcio u otras sales, común en zonas áridas o semiáridas que se forma por evaporación en la superficie del terreno. El proceso de formación del caliche tiene lugar en la época de secas, debido a que el agua subterránea portadora de bicarbonato de calcio asciende por capilaridad hasta la superficie, y al evaporarse queda la sal depositada o acumulada en masas estratiformes.

²⁵**Formación**, es un término general para designar una serie de depósitos o capas sedimentarias con propiedades comunes (composición y estructura) que las diferencian de otras. Puede asociarse en unidades

mayores (Grupos), o subdividirse en unidades menores como Miembros y Capas.

²⁶**Miembro**, es la subdivisión de una formación que se compone por un conjunto de capas de roca con características similares. Varios miembros constituyen una Formación.

²⁷**Fosforita**, es una roca sedimentaria no detrítica que contiene altas cantidades de minerales fosfatados. El contenido en fosfatos es por lo menos de entre 15 y 20 %, una cantidad importante comparada con una roca sedimentaria típica que contiene menos de un 0.2 %. Las fosforitas están esencialmente constituidas por pellets fecales y pequeños nódulos de precipitación coloidal, fragmentos de esqueletos de braquiópodos, huesos y dientes de vertebrados. También de oolitos o nódulos fosfáticos que pueden tener más de 2 mm de diámetro, con formas esféricas, ovaladas y aplanadas. Uno de los principales minerales que constituyen las fosforitas es la apatita.

Cita de este artículo

Cruz-Falcón A., Murillo-Jiménez J. M., Nava-Sánchez E. H . 2016 . Distribución de sales y arsénico en el acuífero de La Paz BCS, México. Recursos Naturales y Sociedad, Vol. 2 (2): 56-75. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2016.02.02.02.0004>

Sometido: 14 de Junio de 2016

Revisado: 18 de Agosto de 2016

Aceptado: 14 de Septiembre de 2016

Editora asociada: Dra. Thelma Castellanos Cervantes

Idioma Inglés Abstract: Ms.C. Diana Dorantes

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández