

Análisis de la intrusión de agua de mar en el acuífero de La Paz (México)

O. Escolero⁽¹⁾ y S. Torres-Onofre⁽²⁾

(1) Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. C.P. 04510
escolero@geologia.unam.mx

(2) Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. C.P. 04510
osandra_13@yahoo.com.mx

RESUMEN

El Acuífero de La Paz, se localiza al sur del Estado de Baja California Sur, México, el cual ha presentado en los últimos años una extracción intensiva de agua subterránea, lo que ha provocado la intrusión de agua de mar hacia el acuífero, amenazando a las fuentes actuales de abastecimiento de agua potable a la ciudad de La Paz. Con objeto de analizar el efecto provocado por diversas políticas de explotación del agua subterránea en este acuífero, se realizó un modelo de simulación de flujo y transporte de solutos (agua marina). Se procesaron seis escenarios, para analizar diferentes comportamientos: 1) Status Quo, 2) Relocalización de pozos, 3) Reasignación de volúmenes de agua, 4) Intercambio de agua, 5) Equilibrio entre recarga y extracción y 6) Según la tendencia inercial. Finalmente, del análisis de los seis escenarios antes enlistados y simulados, se puede concluir que ninguno de ellos, aplicado de manera aislada puede resolver por sí solo el problema de la intrusión marina que presenta el acuífero de La Paz. Sin embargo, una combinación adecuada de ellos, que tome los elementos positivos de cada uno, sí podría incidir de manera positiva para detener y eventualmente reducir la intrusión de agua de mar, para proteger las fuentes de agua para usos prioritarios.

Palabras clave: intrusión marina, manejo de aguas subterráneas, México, modelación matemática, salinidad

Analysis of seawater intrusion in the La Paz aquifer, (Mexico)

ABSTRACT

The La Paz aquifer, is located to the south of Baja California Sur state, Mexico, where has been an intensive groundwater extraction in the last years. This has caused the intrusion of water from the sea towards the aquifer, threatening to the present sources of drinking water supply to the city of La Paz. In order to analyze the effect caused by diverse groundwater management policies in this aquifer was set up a groundwater model to simulate the flow and transport of salinity (sea water). Six scenarios were processed, to analyze different behaviors: 1) Status Quo, 2) Relocation of wells, 3) Reassignment of volumes of water, 4) water Interchange, 5) Balance between recharge and extraction; and 6) Follow the inertial tendency. Finally, from the analysis of the six mentioned scenarios, we concluded that no one of them can solve itself the problem of the marine intrusion. Nevertheless, a suitable combination of these scenarios that takes the positive elements from each one, could affect in positive way to stop and probably to seawater intrusion, and to protect water sources for high-priority uses

Key words: groundwater management, groundwater modelling, Mexico, salinity, seawater intrusion

Introducción

El agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento para el desarrollo socioeconómico de México, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del norte y noroeste del país, donde no existen fuentes alternativas de abastecimiento. Es por ello que la gestión adecuada de este vital recurso debe considerar los aspectos sociales, ecológicos y políticos para el mejor manejo de éste.

Las zonas costeras requieren de una atención

especial ya que el acelerado desarrollo demográfico y turístico demanda un volumen de abastecimiento cada vez mayor que está siendo extraído de los acuíferos a costa del inminente daño que le pueden inducir, por lo que las políticas de manejo deben estar encaminadas no sólo a satisfacer la demanda requerida sino también a atender los aspectos relacionados con problemas de cantidad y calidad del agua. Tal es el caso del acuífero de La Paz, donde es importante analizar la relación agua salina-agua dulce para determinar el grado de trasgresión de agua salina tierra

- ρ = densidad del fluido (kg/m^3)
- ρ^* = densidad del fluido en una fuente de masa (kg/m^3)
- k = permeabilidad (m^2)
- μ = viscosidad del fluido ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
- g = gravedad (m/s^2)
- q = intensidad de flujo de masa de fluido desde una fuente ($\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{s}$)

En la ecuación de flujo se hacen las siguientes consideraciones:

- El medio poroso está completamente saturado
- El flujo del agua se describe por la Ley de Darcy
- El medio poroso es compresible
- El fluido es compresible
- La porosidad y la permeabilidad son funciones espaciales
- La viscosidad del fluido es función de espacio y tiempo y depende de la temperatura y de la concentración del soluto

Ecuación general de transporte de solutos

La ecuación para conservación de un soluto se basa en lo siguiente (USGS, 1997):

- La difusión termal es despreciable

- La difusión de presión es despreciable
- El transporte de soluto a nivel local, intersticial, fluctuaciones en el campo de velocidad y mezclado en poros se describe por un coeficiente de dispersión hidrodinámico.
- La difusión forzada por componentes gravitacional, eléctrico y otros campos es despreciable
- El mecanismo de reacción únicamente es decaimiento lineal o desaparición de soluto.

La ecuación de conservación para el soluto en fase fluida puede ser escrita:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho w)}{\partial t} = \nabla \cdot \epsilon\rho D_s \nabla w + \nabla \cdot \epsilon\rho D_m \nabla w - \nabla \cdot \epsilon\rho v w - \lambda \epsilon\rho w - \rho_b R_{fs} + q\rho^* w^*$$

donde:

- w = concentración de soluto en la fase fluida
- w^* = concentración de soluto en la fuente del fluido
- D_s = coeficiente de dispersión mecánica (m^2/s)
- D_m = difusividad efectiva – molecular de el soluto (m^2/s)
- λ = decaimiento lineal constante (s^{-1})
- R_{fs} = transferencia de soluto de la fase sólida a la del

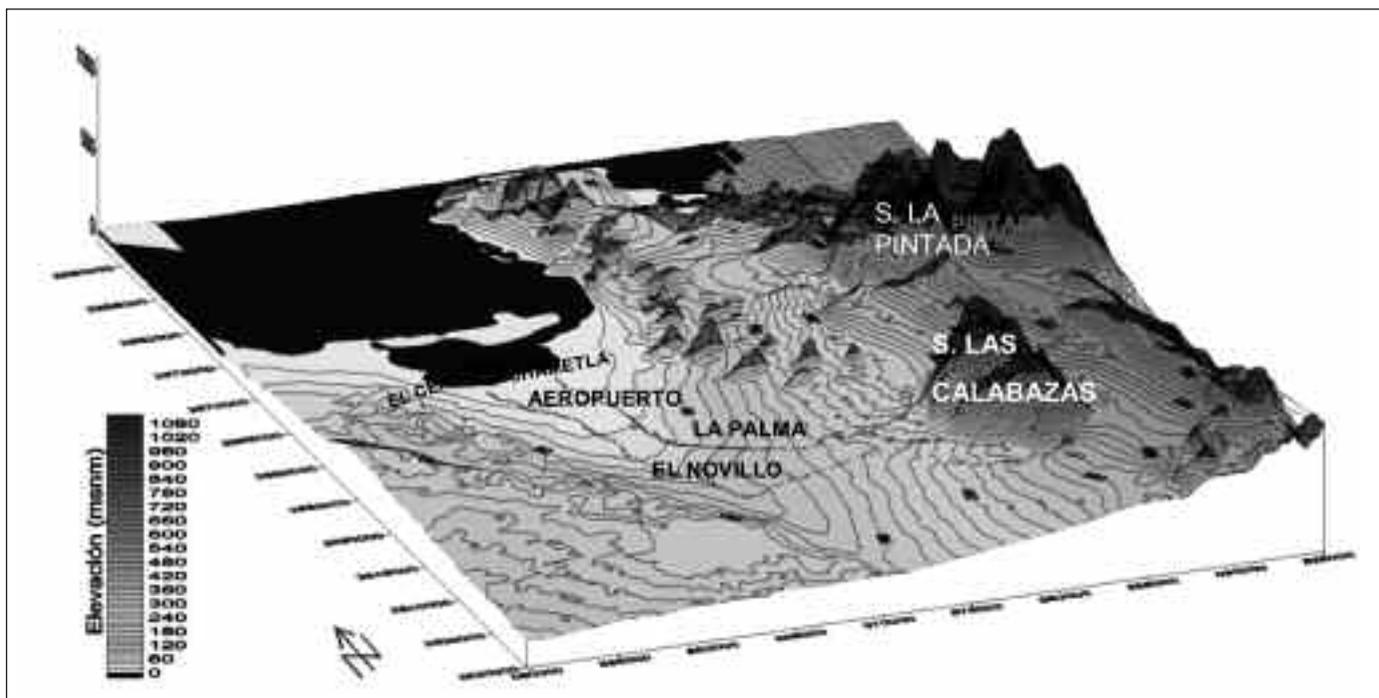


Figura 2. Vista en 3D del Valle de La Paz, B.C.S., México
 Figure 2. View 3D of La Paz Valley, B.C.S., Mexico

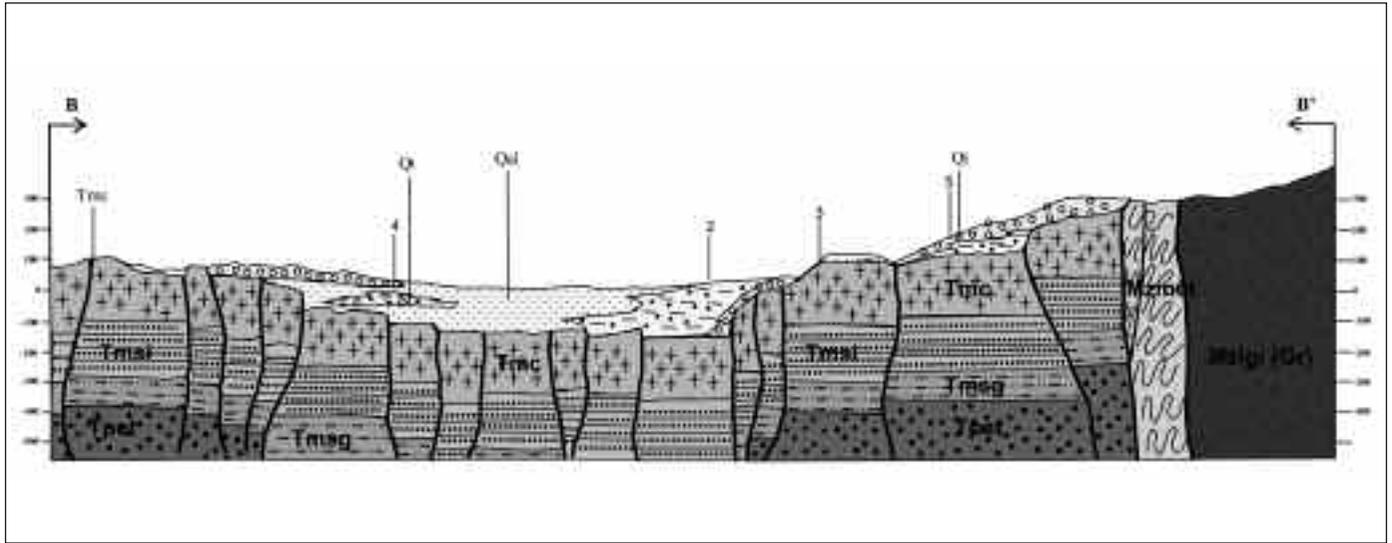


Figura 3. Sección transversal del Valle de La Paz, B.C.S., en donde, (Mzigi) rocas de edad mesozoica de tipo ígneo (gabros y granodioritas), (Mzmet) rocas metamórficas, (Tmc) Formación Comondú (areniscas volcánicas) de edad mioceno, (Tmsi) Formación San Isidro siendo la unidad más inferior de (Tmc) corresponde con material piroclástico, (Tmsg) arenisca tobácea de la Formación San Gregorio, (Tpet) arenisca arcillosa de la Formación Tepetate, (Qal) arenas gruesas de depósitos de aluvi3n, (Qt) dep3sitos de talud material conglomerado

Figure 3. Transversal section of La Paz valley, B.C.S. (Mzigi) igneous rocks of Mesozoic Era (Gabbros and granodiorites), (Mzmet) Metamorphic rocks, (Tmc) Comondú Formation of Miocene Epoch (volcanic sandstones), (Tmsi) pyroclastics material of San Isidro Formation, this is the most inferior unit of Tmc, (Tmsg) tuffaceous sandstone of San Gregorio Formation, (Tpet) argillaceous sandstone of Tepetate Formation, (Qal) heavy sandstones of Alluvium deposits, (Qt) conglomerate material of slope deposits

fluido por unidad de masa de la fase s3lida (kg soluto / s • kg fase s3lida)

ρ_b = densidad del medio poroso (kg/m³)

Una ecuaci3n de conversi3n similar para la fase s3lida se puede escribir de la siguiente manera:

$$\partial(\rho_b \bar{w}) = \rho_b R_{fs} - \lambda \rho_b \bar{w}$$

donde:

\bar{w} = concentraci3n de soluto en la fase s3lida.

Combinando las ecuaciones de fase s3lida y del fluido obtenemos la ecuaci3n final de conservaci3n de soluto

$$\partial(\epsilon + \rho_b K_d) \rho w = \nabla \cdot \epsilon \rho (D_s + D_m) \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho v w - \lambda(\epsilon + \rho_b K_d) \rho w + q \rho^* w^*$$

donde:

K_d = coeficiente de distribuci3n

Ecuaci3n general de densidad variable

Esta ecuaci3n est3 basada en los siguientes par3metros (USGS, 1997):

- La energ3a cin3tica del fluido es despreciable
- La dispersividad termal del transporte toma lugar con un mecanismo an3logo al transporte dispersivo del soluto
- La conducci3n termal ocurre a trav3s del fluido y del medio poroso en paralelo
- El efecto termal por reacciones qu3micas es despreciable
- La conductividad termal no est3n en funci3n de la temperatura ni de la concentraci3n del soluto
- La transferencia de energ3a por radiaci3n es despreciable
- La velocidad del medio poroso durante la compresi3n o expansi3n es despreciable.

La ecuaci3n de energ3a est3n basada en la conservaci3n de entalp3a en el fluido y s3lido del medio poroso. La temperatura es la variable dependiente.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho c_f + (1-\epsilon) \rho_s c_s) T = \nabla \cdot (\epsilon K_f + (1-\epsilon) K_s) |\nabla T +$$

$$\nabla \cdot \epsilon D_H \nabla T - \nabla \cdot \epsilon \rho c_f v T + q_H + q \rho^* c_f T^*$$

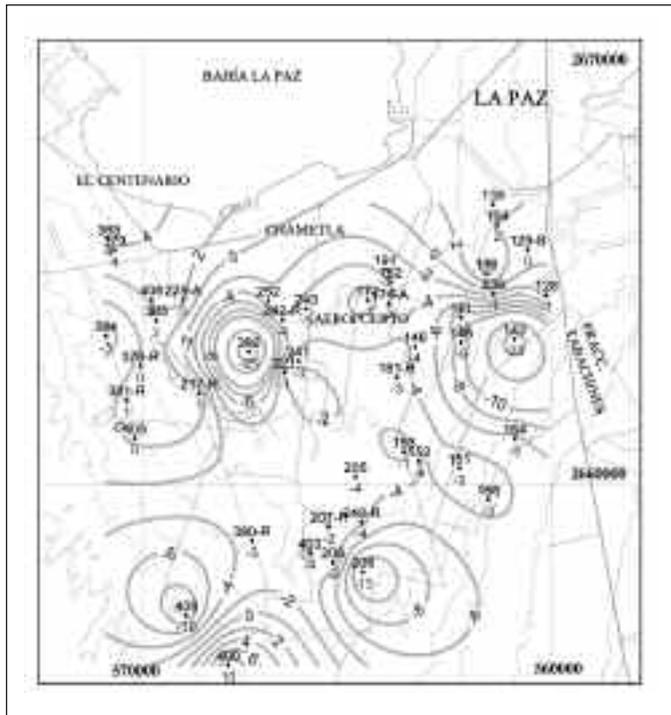


Figura 4. Configuración de la elevación del nivel estático, año 2000, en el Valle de La Paz, B.C.S., México
 Figure 4. Static piezometric level, in the year 2000. La Paz valley, B.C.S., Mexico

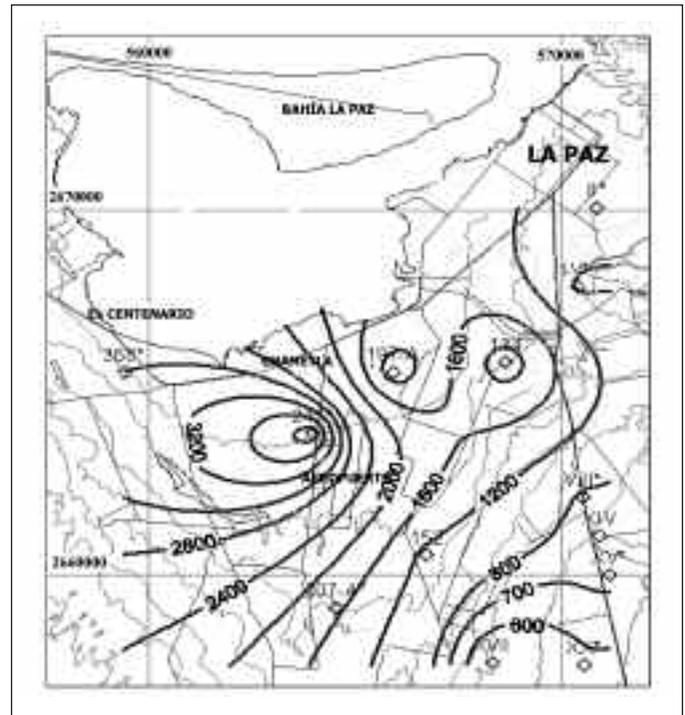


Figura 5. Configuración de Sólidos Totales Disueltos (STD), año 2000, en el Valle de La Paz, B.C.S., México
 Figure 5. Total dissolved solids (TDS) in year 2000. La Paz valley, B.C.S., Mexico

donde:

- T = temperatura del medio poroso y del fluido ($^{\circ}\text{C}$)
- T^* = temperatura del fluido en la fuente ($^{\circ}\text{C}$)
- ρ_s = densidad de la fase sólida (kg/m^3)
- c_f = capacidad calorífica de la fase fluida a presión constante ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- c_s = capacidad calorífica de la fase sólida a presión constante ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- K_f = conductividad termal de la fase fluida ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- K_s = conductividad termal de la fase sólida ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- D_H = dispersión termomecánica ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- q_H = intensidad de calor desde la fuente (W/m^3)
- I = matriz de identidad de rango 3

El modelo numérico para simular el flujo subterráneo se basa en la solución de las ecuaciones antes mencionadas, las cuales se aproximan por medio de diferencias finitas. Se basa en el software HST3D con una interfase ARGUS ONE.

El caso de estudio

El área que comprende el Acuífero de La Paz se localiza en la porción sureste del estado de Baja California

Sur, en el valle denominado "La Paz" el cual se ubica entre los paralelos $24^{\circ}19'52''$ y $23^{\circ}48'22''$ de latitud Norte y los meridianos $110^{\circ}06'18''$ y $110^{\circ}21'53''$ de longitud Oeste. Entre las principales localidades del área de estudio destacan: La Paz, El Centenario, Chametla, El Cardonal, Cajeme, etc., mismos que son parte del municipio de La Paz localizado dentro del área de influencia del Acuífero. El Valle de La Paz presenta un clima de tipo muy seco muy cálido y cálido, con altitudes que van del nivel del mar hasta los 400 m.s.n.m. La temperatura media anual es de 23°C y la precipitación anual es de 400 mm (SARH, 1991).

Debido a que el acuífero de La Paz se encuentra en una zona semiárida de baja precipitación pluvial, presenta año con año problemas derivados de las sequías, acrecentándose cuando se tienen períodos de tiempo prolongados sin presencia de lluvias o con valores por debajo de lo normal. El agua del subsuelo, por su parte, es un recurso de suma importancia en la entidad, cuya creciente extracción hace necesario un mejor conocimiento de su distribución en el subsuelo.

Esta región también es afectada por ciclones, los cuales han causado la erosión de cauces y valles des-

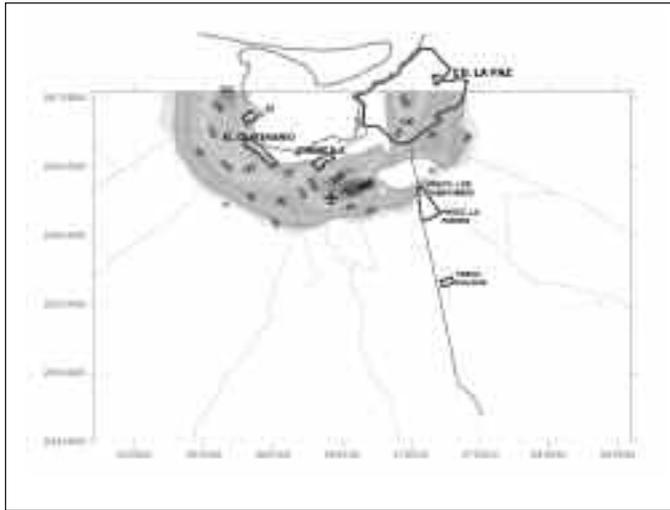


Figura 8. Resultados del escenario 4 (intercambio de agua residual) para concentraciones de STD, Valle de La Paz, B.C.S., México.
 Figure 8. Results of scenario 4 (interchange of residual water) for TDS concentrations. La Paz valley, B.C.S., Mexico.

y limos. Las zonas con materiales de mayor tamaño representan las áreas de mayor permeabilidad y se asocian con depósitos de grava en los canales fluviales (UABC, 1986). Este Valle se interpreta que fue originado a partir de la dinámica de la falla La Paz, a manera de una cuenca *pull apart*, conformándole una geometría triangular vista en planta (Ortega-Gutiérrez, 1982). El espesor de los materiales granulares en el valle varía de 150 a 200 metros (INGESA, 1972). Este valle presenta sedimentos marinos y secuencias volcanoclásticas (derrames, flujos piroclásticos y depósitos granulares consolidados) metamorfizados, deformadas e intrusionadas por rocas plutónicas, materiales que debido a fenómenos de distensión, generaron un depocentro que fue afectado por los fenómenos tectónicos de la apertura del Golfo de California, sobre dichos materiales se presentan acumulaciones de sedimentos marinos y continentales granulares, los cuales conforman la parte superior de la columna estratigráfica existente en esta región (Ranking, 1978).

El medio poroso se desarrolla dentro del acuífero en materiales clásticos de origen principalmente fluvial, los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en el valle, además de presentar facies principalmente continentales, que están conformadas por arenas y gravas. Debido a la alta porosidad de estas rocas y a su poca compactación ayudan a la libre circulación del agua subterránea entre los espacios intergranulares. Este medio poroso de igual manera ha sido controlado por las distintas corrientes super-

ficiales que se han desarrollado dentro de esta región, como son El novillo y La Palma, principalmente.

El medio fracturado se encuentra conformado por la secuencia de rocas ígneas y metamórficas, asociadas con el complejo cristalino que conforma principalmente la parte oriental del valle. Es importante señalar que estos materiales podría considerarse parte del basamento del acuífero, aunque su densidad de fracturamiento puede permitir desarrollar cierto grado de permeabilidad, las características favorables se verán restringidas por los intervalos arcillosos pertenecientes a las filitas, así como a la presencia discontinua de la secuencia ígnea intrusiva que restringen el potencial hidrológico de los materiales metamórficos e ígneos intrusivos de la región. Estos factores son poco alentadores para poder considerar la existencia de un acuífero en el medio fracturado presente en estas unidades.

El movimiento del agua subterránea dentro del valle de La Paz, así como su distribución espacial, se encuentra controlado en el medio granular, por la distribución de las zonas permeables de las diferentes facies de abanicos aluviales, en tanto que en el medio fracturado, su trayectoria estará sujeta al patrón de fracturas y fallas de la secuencia sedimentaria y de los cuerpos de rocas volcánicas, así como de la configuración de los bajos estructurales en el subsuelo.

La recarga principal del acuífero granular proviene del escurrimiento de los altos topográficos, principalmente los ubicados al oriente del valle, y en menor proporción de las mesas ubicadas al occidente y de los lomeríos localizados en su extremo meridional. Se considera que la trayectoria subterránea que sigue el agua en el medio granular a partir de la entrante al valle, ocurre en dirección norte hacia la zona de la costa (ADI, 1997, Antares, 1998, TMI, 1974).

Metodología

Se reinterpretaron 19 pruebas de bombeo distribuidas en la zona de estudio, para poder tener información de conductividades hidráulicas en los diferentes materiales que presenta esta zona, estas conductividades se utilizaron como valores iniciales en el modelo de intrusión marina. El modelo utilizado para la reinterpretación de las pruebas de bombeo, es el modelo de flujo radial dos capas de Rathod y Rushton. Los factores que se incluyen en éste modelo numérico son de particular importancia, en especial es de notar que esta solución considera el marco geológico y las condiciones de campo en las cuales se realizaron las pruebas de bombeo.

El modelo de intrusión marina se realizó con el software HST3D con interfase ARGUS ONE, que resuelve las tres ecuaciones, ecuación de flujo en medios porosos, de transporte de soluto y la ecuación de densidad variable (Argus Holdings, 1997, Anderson y Woessner, 1992). Se estableció el área de modelado tomando como límites la falla la Giganta al occidente, la falla La Paz al oriente, al sur se tomó el límite entre el acuífero de La Paz y el Carrizal, en tanto que al norte se utilizó como límite la bahía de La Paz.

La malla se definió de acuerdo a la zona donde se presenta la intrusión marina y con la distribución actual de los pozos. La malla delimitada tiene 40 kilómetros de largo y 25 kilómetros en sentido transversal al valle. El área de cada una de las celdas definidas es variable y va desde un kilómetro cuadrado en el área más alejada de la costa a 500x500 metros en el centro del valle y hasta 300x300 metros en la zona costera de La Paz. La malla es de 72x55 celdas, lo cual da un total de 3960 celdas en cada una de las 22 capas utilizadas, es decir, que se tiene un total de 87120 celdas.

Con estos datos se inicia la calibración en estado estacionario, la cual reproduce las cargas hidráulicas de la zona de La Paz, cuando aún no se tenían pozos de extracción. Posteriormente, se inicia la etapa de calibración en estado transitorio, y se introducen los pozos de extracción que se tienen reportados y las condiciones iniciales de elevación de nivel estático y sólidos totales disueltos de 1990. Después de repro-

ducir las condiciones iniciales del año de 1990 en la zona de La Paz, B.C.S., se introducen los valores de elevación de nivel estático y sólidos totales disueltos del 2000, con la finalidad de reproducir las condiciones finales de la etapa de calibración del modelo y poder hacer las predicciones a futuro.

El balance de aguas subterráneas de la zona de La Paz tiene como entradas a la infiltración por precipitación de 7 hm³/año, un retorno de riego de 2 hm³/año y una intrusión marina de 18 hm³/año, los cuales nos dan un total de entradas de 27 hm³/año. En tanto que las salidas estimadas son 34 hm³/año por bombeo (ADI Construcciones, 1997).

El balance de masa que reproducía el modelo antes de la calibración en estado transitorio, calcula una infiltración por precipitación más el retorno de riego de 1,67 Hm³/año, mientras que las salidas por bombeo fueron calculadas en 29,25 Hm³/año, estos valores se fueron calibrando hasta alcanzar los valores obtenidos en el balance. En cuanto a las entradas por precipitación y por retorno de riego, se fueron aumentando gradualmente los valores de los polígonos hasta llegar a los 9 hm³/año.

Una vez calibrado el modelo, se realizó la simulación del comportamiento del acuífero ante diferentes escenarios de explotación, siendo seis y denominados: 1) Status Quo, 2) Relocalización de pozos, 3) Reasignación de usos del agua, 4) Intercambio de agua, 5) Equilibrio en el balance y 6) Mantener la tendencia inercial.

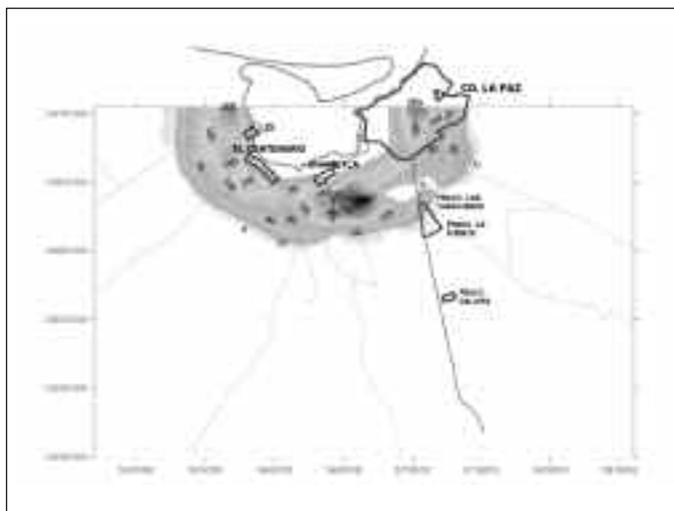


Figura 9. Resultados del escenario 6 (inercial) para concentraciones de STD, Valle de La Paz, B.C.S., México
 Figure 9. Results of scenario 6 (inertial) for TDS concentrations. La Paz valley, B.C.S., Mexico

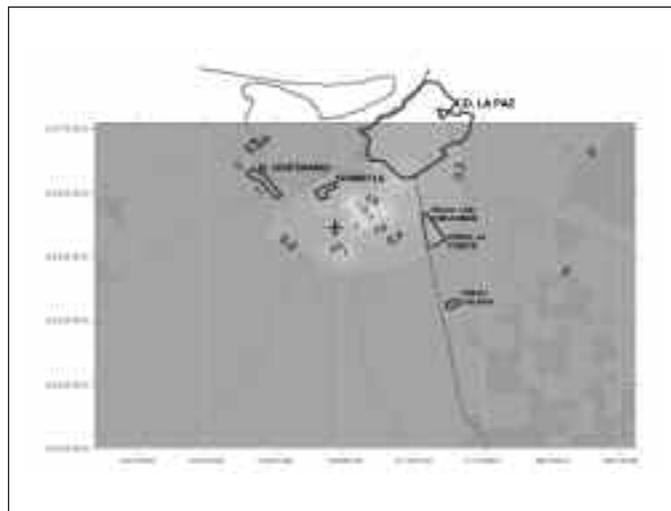


Figura 10. Resultados de abatimientos de la diferencia entre el escenario 1 y 4, Valle de La Paz, B.C.S., México
 Figure 10. Results of the difference between piezometric levels of the scenarios 1 and 4. La Paz valley, B.C.S., Mexico

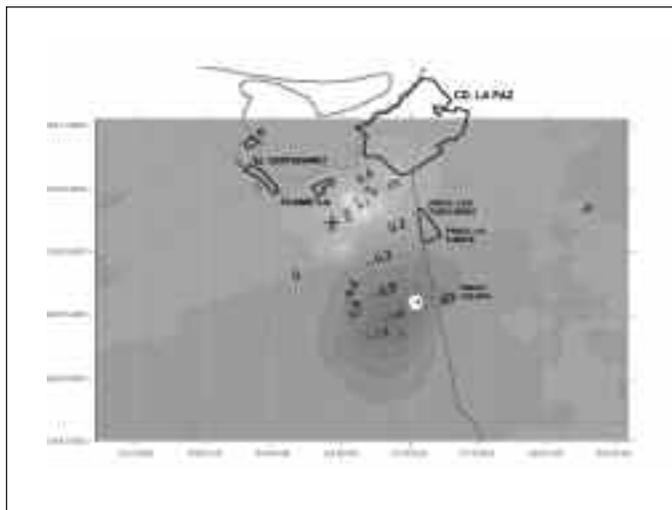


Figura 11. Resultados de abatimientos de la diferencia entre el escenario 1 y 3, Valle de La Paz, B.C.S., México
Figure 11. Results of the difference between piezometric levels of the scenarios 1 and 3. La Paz valley, B.C.S., Mexico

Resultados

Los escenarios que a continuación se describen están referidos a un período de 10 años, que corresponden a la simulación del comportamiento del acuífero en los años 2000-2010.

Escenario 1 (status quo)

En este escenario se plantea continuar con la magnitud actual de extracción de agua subterránea, calculada en 32,32 hm³/año, y una recarga de agua dulce de 21,76 hm³/año, con el objeto de estimar los efectos a 10 años.

Los resultados que se obtuvieron muestran que de continuar con el ritmo actual de explotación en el acuífero se tendrán aumentos en las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos de 150 a 300 ppm en casi todo el acuífero.

Escenario 2 (relocalización de pozos)

Este escenario plantea la opción de relocalizar un volumen de 5 H m³/año extraído en pozos cercanos a la costa, para ser transferidos a otros nuevos pozos localizados en la porción más tierra adentro del acuífero. Para elegir a los pozos que aportarían los volúmenes a ser relocalizados se siguieron estos criterios: a) se propone reducir la extracción en los pozos que

se encuentran dentro de la zona de riego con aguas residuales, y b) se considera reducir la extracción en los pozos que se localizan en la región costera de la bahía de La Paz. Al eliminarles el caudal a los pozos antes mencionados se redujo un volumen de extracción de 4,983,143 m³/año.

En compensación de los 5 hm³ de extracción que se redujo en los pozos mencionados anteriormente, se propuso la compactación de este volumen en 9 pozos profundos perforados en la porción sur del acuífero. Como resultado de la aplicación del Escenario 2, el modelo calcula que la salinidad del agua continuará incrementándose al mismo ritmo que en el escenario anterior, pero habría una disminución en el volumen de entrada de agua de mar, y al mismo tiempo un aumento en los abatimientos del nivel del agua subterránea en la porción sur el acuífero.

Escenario 3 (reasignación de volúmen en pozos de agua potable)

Este escenario 3 plantea la misma reducción de 5 Mm³/a en los pozos de la costa, por lo que se aplicó el mismo esquema usado en el escenario 2 para los pozos con reducción de volumen, y aumentar la extracción hasta llegar a 5 Mm³/a adicionales en los pozos de agua potable existentes.

Al aplicar el escenario 3, se obtienen los mismos resultados que en el escenario 2, pero con una distribución diferente de los incrementos de salinidad y en los incrementos en el ritmo de abatimiento de los niveles del agua subterránea.

Escenario 4 (intercambio con agua residual)

En este escenario, 5 millones de metros cúbicos extraídos en pozos cercanos a la costa se dejan de extraer al ser intercambiados por agua residual. Para la aplicación de esta política, se siguió la misma mecánica establecida en el escenario 2.

De acuerdo a los resultados obtenidos al aplicar este escenario se observan que no se presentan mejoras muy notorias en la mayor parte de la zona de estudio, es decir, que conservan las mismas concentraciones máximas, pero se observa una disminución en la extensión de las zonas de mayor salinidad, y se observan unas leves recuperaciones del nivel estático en las zonas donde se redujo la extracción de agua subterránea. Al realizar una comparación entre el escenario 1 (*status quo*) y el escenario 4 (intercambio), podemos observar que se tienen recuperaciones

del nivel estático de hasta 1.2 y 1.8 metros en un lapso de 10 años, mientras que la entrada de agua marina se redujo a 4,23 hm³/año.

Escenario 5 (condiciones de equilibrio)

En este escenario la extracción total se disminuye proporcionalmente en todos los pozos hasta igualarlo con la recarga, la cual es de 21,76 hm³/año. Al generar las condiciones de equilibrio en el acuífero de La Paz, las concentraciones de STD mejoran en casi todo el acuífero. Al realizar la comparación entre el escenario 1 (Statu Quo) y el escenario 5 (Equilibrio), podemos observar que la zona de estudio presenta tan sólo recuperaciones, siendo las máximas de 3,2 metros en un lapso de 10 años.

Escenario 6 (inercial)

En el escenario 6 se permite el incremento de volumen de extracción hasta un 25% arriba de la cifra actual, distribuida de manera proporcional en toda la zona. Para aumentar un 25 % la extracción en todos los pozos de la zona, a cada uno de los 159 pozos existentes se les aplicó un factor de incremento.

Como resultado de la aplicación de este escenario 6, se genera un incremento de concentración de STD, en zonas en las que no se presentan en los escenarios anteriores. Los abatimientos adicionales generados a partir del incremento del 25% en la extracción actual son de por lo menos 10 m y 17 m.

Al realizar la comparación entre el escenario 1 (Statu Quo) y el escenario 6 (Inercial), se muestra que se incrementan los abatimientos que ya se venían presentando en los escenarios anteriores, con una entrada de mar de 5,23 Mm³/año, la cual aumentó 0,33 Mm³/año, con respecto a la entrada de agua marina actual.

Conclusiones

De acuerdo con las simulaciones realizadas, de seguir con las mismas condiciones actuales de extracción de agua subterránea, la calidad del agua se verá afectada con incrementos de salinidad de hasta 300 ppm en STD, y los abatimientos aumentarán de 4 a 8 m para el año 2010.

Al utilizarse como política de manejo del acuífero el escenario 2 o el escenario 3, se tendrá una disminución de la extracción en la zona costera y por lo tanto disminuirá la entrada de agua marina en 0,66

Mm³/año, sin embargo, se generará una nueva zona de abatimiento al sur del valle.

Al igualar la recarga con la extracción en el valle de La Paz, se tienen considerables mejorías en la calidad del agua, las cuales son de hasta 120 y 150 ppm de STD y Los niveles estáticos tendrán recuperaciones de hasta 3,2 metros, lo cual indica que este escenario podría ser el más adecuado de utilizarse para el mejor manejo del agua subterránea del valle de La Paz.

Al aumentar al 25% la extracción en cada uno de los 159 pozos que se reportan en el valle de La Paz, la calidad del agua empeorará, y el decremento en el nivel estático de hasta 3 metros, por lo que este escenario se considera no adecuado de utilizarse ya que la entrada de agua marina será de 5,23 hm³/año, aumentando 0,33 hm³/año con respecto a la entrada de agua marina actual.

Del análisis de los diversos escenarios planteados y simulados, se puede concluir que ninguno de ellos, aplicado de manera aislada puede resolver por sí solo el problema de la intrusión marina. Sin embargo, una combinación adecuada de ellos, que tome los elementos positivos de cada uno de ellos si podría incidir de manera positiva para detener y eventualmente reducir la intrusión de agua de mar, para proteger las fuentes de agua para usos prioritarios.

Referencias

- ADI Construcciones, S.A. de C.V., 1997. *Censo de captaciones de agua subterráneas y colección de datos geohidrológicos en la zona La Paz-El Carrizal*, B.C.S., México.
- Anderson, M. P. y Woessner, W. 1992. *Applied groundwater modeling, Simulation of flow and advective transport*, Academic Press.
- Antares, S.A. de C.V., 1998. *Estudio de simulación hidrodinámica de los acuíferos de La Paz y San José del Cabo, Baja California Sur, México*.
- ARGUS HOLDINGS, 1997. *Argus One, User's guide*, Argus inteware, Inc.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2000. *Determinación de la disponibilidad del Acuífero de La Paz, Baja California, México*.
- INGESA, Ingeniería y Geotecnia, S.A., 1972. *Estudios geohidrológicos de los valles de La Paz y Carrizal, Territorio de Baja California, México*.
- Ortega -Gutiérrez, F., 1982. *Evolución magmática y metamórfica del Complejo Cristalino de La Paz, Sociedad Geológica Minera (SGM)*. Resúmenes de la Convención Geológica.
- Rangin C, 1978. *Espeulative model of Mesozoic geodynamic, Central Baja California to northestern Sonora, México*.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH),

1991. *Sinopsis geohidrológica del Estado de Baja California Sur, México.*

Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (TMI), 1974. *Estudio Geohidrológico del Valle de La Paz y Carrizal en el territorio de Baja California, México.*

Universidad Autónoma de Baja California (UABC), 1986.

Estudio Geohidrológico complementario de las Cuencas La Paz- El Carrizal, para proporcionar agua en bloque a la Ciudad de La Paz, B.C.S. México.

USGS, 1997. *Guide to the revised Heat and solute transport simulator: HST3D-Version 2*, Water-resource Investigation report 97-4157, Denver, Colorado.

Recibido: enero 2007

Aceptado: mayo 2007