

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA Y BALANCE HIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO DE LA PAZ, BCS, MÉXICO

Estimation of the hydrological balance and recharge of the aquifer of la Paz, BCS, Mexico

Arturo Cruz Falcón ✉, Jorge Ramírez-Hernández, Rogelio Vázquez-González, Enrique Hiparco Nava-Sánchez, Enrique Troyo-Diéguez, Héctor Cirilo Fraga-Palomino

(ACF) (ETD) (HCFP) Programa de Agricultura en Zonas Áridas, CIBNOR, Instituto Politécnico Nacional No. 195 Col. Playa Palo de Santa Rita, Sur. La Paz BCS, 23096, México. afacon04@cibnor.mx
(JRH) Departamento de Ingeniería, UABC, Mexicali BC.
(RVG) Departamento de Geofísica de Exploración, CICESE, Ensenada BC.
(EHNS) Departamento de Oceanología, CICIMAR, La Paz BCS.

Artículo recibido: 01 de julio de 2009, **aceptado:** 05 de febrero de 2013

RESUMEN. Debido a la necesidad de contar con agua potable de manera sustentable para el desarrollo de la ciudad de La Paz, es importante conocer el balance hidrológico del acuífero para determinar cómo regular la extracción de agua subterránea. Partiendo de que la recarga vertical por lluvias en la cuenca de La Paz ocurre predominantemente en las zonas elevadas localizadas al este y sureste, la recarga del acuífero, el cual se localiza en el valle, se realiza principalmente por flujo subterráneo. Para estimar esta recarga se utilizó el método de flujo subterráneo aplicando la Ley de Darcy, con información piezométrica de la zona de explotación acuífera. Se estimó la recarga horizontal de agua dulce, intrusión de agua de mar, así como la recarga vertical por lluvias, en una superficie acuífera de 200 km² (zona acuífera de explotación). Los resultados indican una recarga total de 22.98 Mm³ año⁻¹, donde la intrusión de agua de mar es de 1.73 Mm³ año⁻¹. Se estimó el balance del acuífero con la ecuación general de balance hidrológico incluyendo varias componentes importantes. Con una extracción de 30.78 Mm³ año⁻¹ para el 2004 y una descarga subterránea a la Ensenada de La Paz de 1.90 Mm³ año⁻¹, se estimó un balance de -9.70 Mm³ año⁻¹. Se hizo una comparación de estimaciones de recarga y balance hidrológico de varios estudios. En todos ellos se destaca que la extracción es mayor a la recarga, y que el acuífero se encuentra sobreexplotado, por lo que es necesario tomar medidas para conservarlo.

Palabras clave: Acuífero de La Paz, cuenca de La Paz, recarga horizontal, balance hidrológico, intrusión marina, flujo de agua subterráneo

ABSTRACT. The need to count on a sustainable supply of fresh water for the development of the city of La Paz makes it important to define the hydrological balance of the aquifer in order to determine how to regulate the extraction of groundwater. Considering that the vertical recharge provided by rains to the basin of La Paz occurs mainly in the higher areas located to the east and southeast, the aquifer that is located in the valley is recharged mainly by underground water flow. In order to estimate this recharge, the underground flow method was used, applying Darcy's Law and piezometrical data for the area of aquifer exploitation. The horizontal recharge of freshwater, the intrusion of sea water and the vertical recharge provided by rains were estimated for an aquifer surface of 200 km² (area of aquifer exploitation). Results provided a total recharge of 22.98 Mm³ year⁻¹ with an intrusion of sea water of 1.73 Mm³ year⁻¹. The balance of the aquifer was estimated with the general hydrological balance equation including several important components. With an extraction of 30.78 Mm³ year⁻¹ for the year 2004 and a groundwater discharge to the Ensenada de La Paz of 1.90 Mm³ year⁻¹, a balance of -9.70 Mm³ year⁻¹ was estimated. The estimations of recharges and hydrological balances of several studies were compared. All stated that extraction is greater than recharge and that the aquifer is over-exploited, for which reason it is necessary to take measures to preserve it.

Key words: Aquifer of La Paz, basin of La Paz, horizontal recharge, hydrological balance, intrusion of sea water, groundwater water flow

INTRODUCCIÓN

La ciudad de La Paz se localiza en el extremo sur de la península de Baja California. Durante años la fuente de abastecimiento de agua para la población y agricultura se ha obtenido de la explotación de agua subterránea del acuífero del valle de La Paz, pero debido al incremento en la demanda de agua por el aumento de la población, desde hace algunos años el acuífero se encuentra en condición de sobreexplotación (CNA 1997). Uno de los principales problemas en lo que se refiere a la sobreexplotación del acuífero ha sido la extracción de agua para satisfacer las necesidades de la población y el riego agrícola, sin un control adecuado, pero también debido al desconocimiento e incertidumbre en las estimaciones de recarga (Bridget *et al.* 2002).

Para hacer un uso racional del acuífero es necesario tener un conocimiento de las condiciones que lo caracterizan, lo que permite poder regular la extracción y administrar adecuadamente el recurso (Escolero & Torres 2007). Uno de los principales requerimientos es la componente de recarga natural, que es indispensable para determinar el balance hidrológico, de esta manera precisar cual debe ser el volumen de extracción de agua para mantener un equilibrio y lograr la conservación del acuífero (Sophocleous 1991). Para el manejo eficiente de los recursos hídricos subterráneos, la cuantificación de la recarga natural es un requisito fundamental, sobre todo en regiones de alta demanda de agua subterránea, en zonas áridas que carecen de ríos y lagos, y donde este recurso es la llave para el desarrollo económico (Sophocleous 1991). La recarga de agua subterránea es un proceso mediante el cual el agua superficial o de lluvia se percola a través del suelo hasta alcanzar el nivel de agua subterránea (Davis & Wiest 1971).

La recarga natural del acuífero de La Paz proviene en su mayor parte de la precipitación que es captada en las elevaciones montañosas ubicadas al este y sureste de la cuenca de La Paz, sierra Las Cruces y El Novillo, donde el agua de lluvia se filtra entre el material ígneo y metamórfico intemperizado, y por las grietas o fracturas, y se transporta lentamente pendiente abajo en forma subterránea

para recargar al acuífero que se encuentra en el valle (Cruz *et al.* 2011). La recarga proviene también, aunque en menor medida, por la infiltración directa de las lluvias que ocurren en el valle (UABCS 1986; CIGSA 2001; CONAGUA 2010). Por lo general el estudio de un sistema acuífero es difícil y complejo, generalmente se dispone de datos limitados, y la estimación de la recarga es uno de los componentes más difícil de medir en la evaluación de los recursos de agua subterránea (Kommadath 2000; Bridget *et al.* 2002). Cualquier método que se utilice está normalmente sujeto a errores e incertidumbres (Kommadath 2000).

Balance Hidrológico

Un sistema hidrológico en cualquier acuífero puede ser descrito mediante un balance hidrológico, en el que se consideran entradas y salidas de agua. Si las salidas no son iguales a las entradas, entonces existe un cambio en el almacenamiento. Este balance se representa por la ecuación (Freeze & Cherry 1979; Tinajero 1982):

$$ds/dt = I - Q \quad (1)$$

Donde:

ds/dt = cambio en el almacenamiento de agua por unidad de tiempo. I = entradas de agua al sistema. Q = salidas de agua del sistema.

Las lluvias que se registran en esta región se presentan normalmente en el verano, principalmente durante los meses de agosto y septiembre, muchas veces influenciadas por la presencia de huracanes y tormentas tropicales, por lo que ocurre una recarga vertical directa en los acuíferos de la zona (CIGSA 2001; Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz BCS 2002; CONAGUA 2010). Sin embargo, a lo largo del año continúa ocurriendo recarga de los acuíferos en forma horizontal, proveniente de las zonas elevadas de captación y recarga ubicadas al este y sureste de la cuenca de La Paz. De ahí que es importante estimar tanto la recarga horizontal como la vertical, para incluir en la ecuación de balance (Cruz *et al.* 2011).

Flujo subterráneo

Generalmente los flujos subterráneos abastecen de agua a los acuíferos, pero también pueden aflorar en manantiales, descargar en algún canal, río, lago, o en el mar. El agua subterránea se desplaza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos, por lo que su energía procede esencialmente de las diferencias de nivel y de presión (Davis & Wiest 1971). Un flujo subterráneo en un sistema acuífero se puede calcular por medio de la ley de Darcy (Freeze & Cherry 1979) a partir de la diferencia de niveles piezométricos. La Ley de Darcy establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de recarga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo (Tinajero 1982). Conociendo la superficie de una celda delimitada entre curvas equipotenciales y líneas de flujo, y con la transmisividad, se puede calcular el caudal de agua que fluye en la unidad de tiempo. Esto se representa mediante una forma de presentación de la Ley de Darcy (Castany 1971; Tinajero 1982):

$$Q = TB \quad (2)$$

Donde:

Q = caudal ($\text{m}^3 \text{ día}^{-1}$). T = transmisividad de la capa acuífera ($\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$). B = ancho de la celda (m) medido perpendicular al gradiente hidráulico. l = gradiente hidráulico (adimensional).

La transmisividad se obtiene con el producto de la conductividad hidráulica por el espesor de la capa acuífera, y el gradiente hidráulico se calcula por la diferencia de los niveles piezométricos entre su distancia horizontal. A la fecha se han realizado varios estudios de balance hidrológico en el acuífero de La Paz, sin embargo no se ha precisado bien el método, la superficie acuífera utilizada, y las componentes o variables no han sido las mismas. La SARH-CNA (1991) llevaron a cabo un estudio de disponibilidad de los acuíferos del estado de Baja California Sur a partir de un balance hidrometeorológico, encuentran que la mayoría de ellos están sobreexplotados. La CNA (1997) realizó trabajos

geohidrológicos diversos y una recopilación de otros estudios del acuífero de La Paz-El Carrizal; menciona que existe una señal de alerta al continuar el ritmo de explotación de las aguas del subsuelo, ya que se pone en alto riesgo el equilibrio y vida útil del mismo, favoreciendo el avance de la interfase salina. La CNA (1999) en un estudio de disponibilidad de agua del acuífero de La Paz por el método de balance de agua subterránea, encuentra que no existe volumen disponible para nuevas concesiones. CIGSA (2001) llevó a cabo una recopilación y reinterpretación de información geohidrológica y geofísica; estimaron la recarga natural donde sus resultados evidencian la sobreexplotación del acuífero. En el estudio para el Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz BCS (2002) se estimó la recarga del acuífero de La Paz, obtuvieron un balance negativo, situación que lo sitúa en un futuro crítico. Drago & Maddock (2004) generaron un modelo hidrológico para estimar la necesidad de agua en la ciudad de La Paz a partir del crecimiento poblacional durante las próximas décadas, así mismo estimaron la recarga de la zona acuífera, con el más bajo valor de todos los estudios realizados. Escolero & Torres (2007) realizaron un modelo de flujo hidrodinámico para determinar la intrusión marina en la zona que corresponde al acuífero de La Paz, debido a la contaminación por agua de mar y deterioro de la calidad de agua subterránea por causa de la sobreexplotación. Proponen algunas alternativas de solución al problema. Aparte de los estudios llevados a cabo por instituciones gubernamentales o empresas particulares subcontratadas, relacionados con la recarga, balance hidrológico e intrusión marina, se pueden citar algunos como el de Henry 1959; Johannes & Hearn 1985; Sophocleus 1991; Flores-Márquez *et al.* 1998; Kommadath 2000; Davisson & Rose 2000; Bridget *et al.* 2002; Katpatal & Dube 2004; Rangel-Medina *et al.* 2004; Canales & Islas 2005; Fikos *et al.* 2005; Steinitz *et al.* 2005; Egboka *et al.* 2006.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El valle de La Paz, se localiza en la parte sur

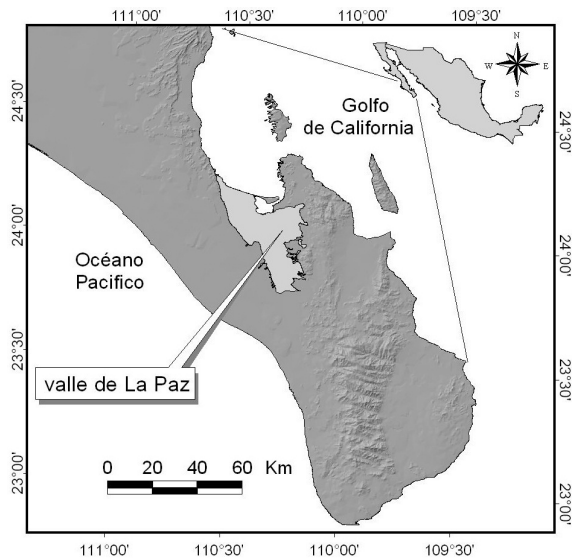


Figura 1. Localización del área de estudio.

Figure 1. Location of the study area.

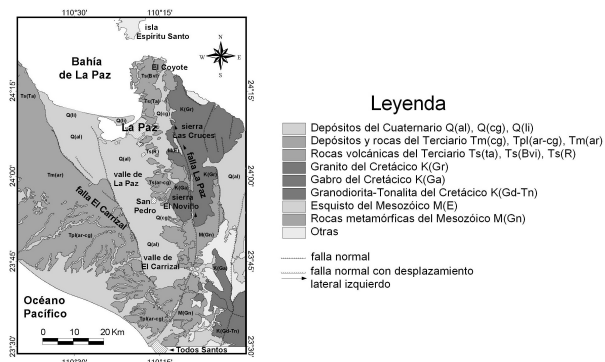


Figura 2. Mapa geológico-estructural del valle de La Paz-El Carrizal. Modificado de las cartas geológicas F12-3-5-6 y G12-10-11 Álvarez et al. (1997).

Figure 2. Geological-structural map of the valley of La Paz-El Carrizal. Modified from geological charts F12-3-5-6 and G12-10-11 Álvarez et al. (1997).

de la península de Baja California, donde se asienta la ciudad de La Paz (Figura 1). El clima en esta zona es predominantemente seco con un rango de temperatura media anual que varía de 20 a 26 °C, alcanzando temperaturas máximas en los meses de julio, agosto y septiembre de hasta los 40-45 °C. La precipitación total anual es de 265 mm (CNA 2005), que ocurre en su mayor parte durante el verano, con los más altos valores en agosto y septiembre. Al final del verano se presentan tormentas tropicales y ciclones que ayudan a recargar los acuíferos de la

región por las precipitaciones que traen asociadas. Existen cuatro presas captadoras de agua en la zona, siendo la de La Buena Mujer, que se localiza al este de la ciudad de La Paz, la más importante para el control de avenidas así como para recargar el acuífero.

Marco Geológico

Estructuralmente el valle de La Paz está formado por un graben o fosa tectónica con orientación norte-sur, limitado al este por la falla La Paz, ubicada en las faldas de la sierra Las Cruces, y al oeste por la falla El Carrizal (Álvarez et al. 1997), Figura 2. De manera general, la geología del valle de La Paz-El Carrizal se caracteriza por una secuencia de sedimentos marinos y abanicos aluviales recientes, conformados por conglomerados y sedimentos poco consolidados y no consolidados de arenas, limos y arcillas. En el oeste del valle afloran rocas con edades que van del Terciario Medio al Reciente y constituyen la formación San Gregorio (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) que contiene una alternancia de areniscas tobáceas, lutitas silicificadas, fangolitas, areniscas conglomeráticas y capas de fosforita intercaladas; la formación San Isidro (inicios del Mioceno) constituida por areniscas glauconíticas, conglomerados, lutitas y algunas capas de tobas riolíticas de color rosado; y la formación Comondú (Mioceno Superior) formada por areniscas y conglomerados volcanoclásticos, tobas riolíticas, lahares andesíticos y flujos de lava. Hacia el noreste afloran una serie de rocas del Cretácico al Reciente que forman las sierras Las Cruces y El Novillo (Figura 2), la primera constituida por rocas ígneas intrusivas principalmente granito y tonalita, y la segunda constituida por gabro. En los alrededores de la ciudad de La Paz se presenta una secuencia de rocas volcánicas y volcanosedimentarias, que se considera como la unidad más joven de la Formación Comondú (Hausback 1984), y consiste de tobas, brechas y aglomerados volcánicos, así como lavas riolíticas.

Acuífero de la Paz

El acuífero de La Paz se clasifica como un

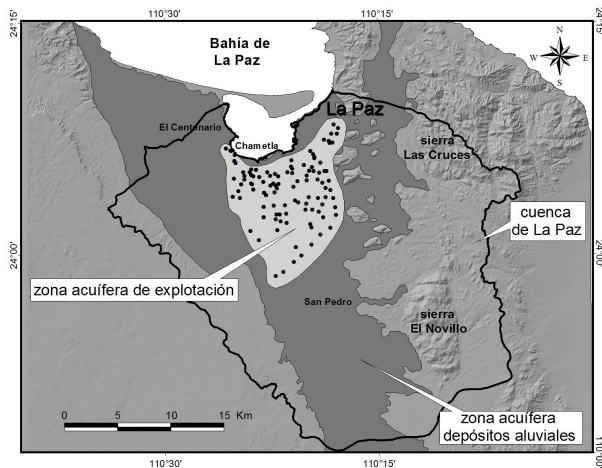


Figura 3. Zona acuífera cubierta por depósitos aluviales (polígono gris oscuro, 858 km²), zona acuífera de explotación (polígono gris claro, 200 km²) y cuenca de La Paz (delimitada por la línea negra, 1 275 km²).

Figure 3. Aquifer zone covered by alluvial deposits (dark grey polygon, 858 km²), area of aquifer exploitation (light gray polygon, 200 km²) and the basin of La Paz (limited by the black line, 1 275 km²).

acuífero libre (CNA 1997, 1999, 2002; CIGSA 2001; Cruz 2007; Escolero & Torres 2007) compuesto por material detrítico, desarrollado en un medio granular con estratos de baja permeabilidad distribuidos en forma irregular en el subsuelo. Se encuentra constituido principalmente por materiales aluviales de alta permeabilidad que suprayacen a sedimentos arcillo arenosos, rocas volcánicas fracturadas y piroclastos de permeabilidad baja a secundaria. La base de estas unidades corresponde a un complejo ígneo metamórfico de naturaleza impermeable (CNA 1997). Este acuífero se define también como un acuífero costero porque su frontera norte corresponde al nivel del mar, situación que lo hace vulnerable a la contaminación por intrusión marina. El acuífero de La Paz (CNA 1999) es uno de los más importantes de la entidad ya que abastece a la ciudad del La Paz, capital del Estado, la cual demanda aproximadamente las dos terceras partes del agua subterránea que se extrae, y atiende una zona agrícola importante con una superficie aproximada de 1900 ha. El agua del acuífero está sobre concesionada y se encuentra en condiciones de sobre-explotación debido a que las extracciones anuales han sobrepasado la disponibilidad total del agua,

ya que 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 habitante (CNA 1999), posiblemente debido a la enorme cantidad de fugas en la red de distribución de agua potable. El acuífero de La Paz se distribuye en toda la zona del valle cubierta por los depósitos aluviales dentro de la cuenca (Figura 3), que se extienden sobre una superficie de aproximadamente 858 km². Para los propósitos de este trabajo y por motivo de cálculos relacionados con el balance hidrológico, la superficie utilizada se limita a la zona acuífera de explotación que es donde se encuentran la mayor cantidad de pozos de uso agrícola y urbano, la cual cubre una superficie aproximada de 200 Km² (Figura 3).

Métodos

Debido a que uno de los principales objetivos de este estudio es obtener el balance hidrológico del acuífero de La Paz, es necesario contar con información de las componentes de entrada y de salida al sistema acuífero para desarrollar la ecuación (1). Algunas componentes para incluir en la ecuación se obtuvieron a partir de la información de la CONAGUA y de estudios o informes oficiales, tal es el caso de la recarga por riego y de la explotación de pozos. Sin embargo, se consideró importante calcular o estimar otras componentes como la recarga vertical, recarga horizontal de agua dulce e intrusión marina, así como la descarga de agua subterránea al mar. Para estimar la recarga horizontal de agua dulce e intrusión por agua de mar, se utilizó el método de flujo subterráneo (Castany 1971; Davis & Wiest 1971; Tinajero 1982; Sophocleous 1991; Kommadath 2000; Bridget et al. 2002) que utiliza los gradientes hidráulicos. Este método se fundamenta en la ley de Darcy (Freeze & Cherry 1979) y maneja la diferencia de niveles piezométricos a partir de celdas de gradiente hidráulico (Castany 1971; Tinajero 1982). Para esto se utilizó la ecuación (2). Para calcular la recarga vertical de la misma zona acuífera se utilizó el modelo de infiltración obtenido por Cruz et al. (2011). La descarga al mar de agua subterránea se calculó a partir de este mismo mo-

delo, junto con el dato de la extracción de agua y un factor de descarga de agua subterránea descrito en Taniguchi *et al.* (2002). El método de balance hidrológico (Sophocleous 1991; Kommadath 2000; Bridget *et al.* 2002; Egboka *et al.* 2006), que utiliza la ecuación general de balance hidrológico (Davis & Wiest 1971; Freeze & Cherry 1979; Tinajero 1982; Canales & Islas 2005; Fikos *et al.* 2005; Steinitz *et al.* 2005) incluye la mayoría de las componentes de entrada y salida de este sistema acuífero, se usó para estimar el cambio de almacenamiento.

Información requerida

Para la estimación de recarga se utilizó la información de la profundidad al nivel estático de los pozos del 2004, proporcionada por la CNA. Se utilizaron además los valores de conductividad, transmisividad hidráulica de los materiales del subsuelo, y el espesor de la capa acuífera, del trabajo de CIGSA (2001). Para obtener la elevación del nivel estático se utilizó la altura del brocal de los pozos y la elevación topográfica del lugar. El modelo de infiltración de la cuenca de La Paz utilizado para calcular la recarga vertical en la zona acuífera de explotación, se obtuvo del estudio de Cruz *et al.* (2011).

Celdas de gradiente hidráulico

A partir de la elevación de la superficie piezométrica, en este caso los contornos de elevación del nivel estático para el año 2004, se generaron polígonos irregulares o celdas de flujo. Se consideró un desnivel (h_1-h_2) de 2 m para la zona de recarga por agua dulce (localizada al este, sureste, sur y suroeste de la zona acuífera), con las celdas numeradas de la C1 a la C9 (Figura 4). Para la recarga producida por la intrusión de agua de mar (norte y noroeste de la zona acuífera), con un desnivel de 1 m, se utilizaron las celdas C10 a la C14 (Figura 4). El polígono envolvente que se forma con los límites externos de las celdas tiene un superficie aproximada de 60.67 km² (Figura 4). La utilización y delimitación de este polígono es debido a que solo en esta área se encuentran los pozos con información piezométrica y transmisividad, a partir de pruebas

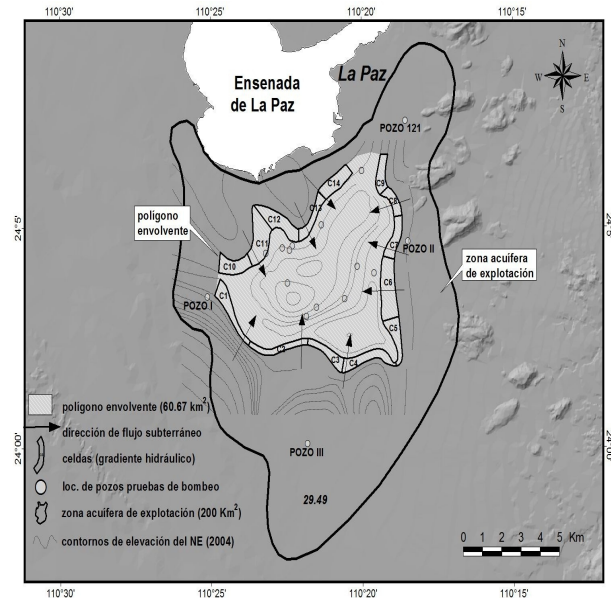


Figura 4. Celdas de gradiente hidráulico para determinar el flujo horizontal de agua dulce (C1 a C9) y flujo de agua de mar (C10 a C14) en el área de 60.67 km² (polígono gris claro). Se muestra la zona acuífera de explotación de 200 km² (polígono línea negra), la dirección de flujo subterráneo, los pozos de prueba de bombeo, y los contornos de elevación del nivel estático de 2004.

Figure 4. Hydraulic gradient cells used to determine the horizontal flow of freshwater (C1 to C9) and the flow of sea water (C10 to C14) in the area of 60.67 km² (light gray polygon). The area of aquifer exploitation of 200 km² (black line polygon), the underground flow direction, the pumping test wells, and the static level elevation contours of 2004 are shown.

de pozo (CIGSA 2001). Para el cálculo del caudal subterráneo, además de determinar las dimensiones de las celdas que ayudan a definir el gradiente hidráulico, se consideraron la transmisividad y el espesor de la capa acuífera.

RESULTADOS

Resultados preliminares

Recarga de agua dulce

Para la estimación de la recarga horizontal de agua dulce, se calculó un caudal de agua por medio de los valores de la transmisividad y espesor de las capas. Para asignar estos valores a las celdas de flujo (C1 a C9) se utilizaron las transmisividades de los pozos que se encuentran por fuera del polígono formado por las celdas de gradiente hidráulico, que

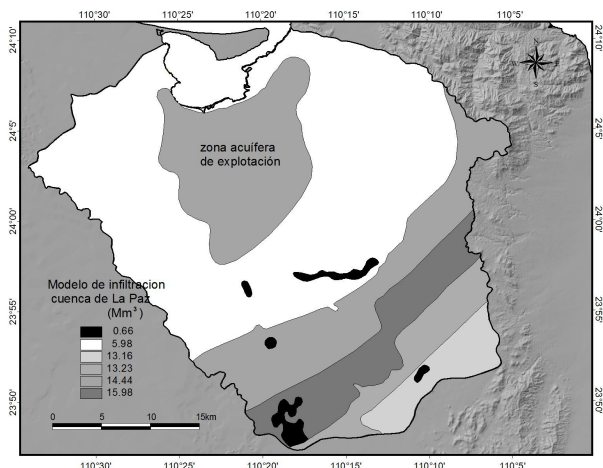


Figura 5. Modelo de infiltración de la cuenca de La Paz (modificado de Cruz et al. 2011). Las unidades (por tonalidad) están en Mm^3 . En el área de color blanco es donde se ubica el polígono de la zona acuífera de explotación ($200 km^2$).

Figure 5. Infiltration model for the basin of La Paz (modified from Cruz et al. 2011). Units (by tone) are in Mm^3 . The white colour area contains the polygon of the area of aquifer exploitation ($200 km^2$).

fueron los pozos I, II, III, y 121 (Figura 4). Se midió el ancho y largo promedio de cada celda y se calculó el gradiente hidráulico con $(h_1-h_2) /$ largo de la celda. El caudal fue obtenido con el producto del ancho de la celda por el gradiente hidráulico por la transmisividad. Se estimó una recarga de $5.10 Mm^3$ (Tabla 1). Debido a que la mayoría de los pozos de explotación se encuentran distribuidos en un área de aproximadamente $200 km^2$ denominada zona acuífera de explotación (Figuras 3 y 4), y la estimación de la recarga se realizó para una superficie de $60.67 km^2$, que es el polígono envolvente (Figura 4). Como la recarga horizontal estimada de $5.10 Mm^3$, equivale $0.08406 Mm^3 km^{-2}$. Por tanto, para la zona acuífera de explotación de $200 km^2$, bajo la consideración de que la conductividad hidráulica presenta una continuidad lateral, se estimó una recarga total de agua dulce de $16.81 Mm^3$.

Intrusión de agua de mar

Para la estimación de la intrusión marina se llevó a cabo el mismo procedimiento anterior. Se consideró el espesor de la capa acuífera como el

promedio de la capa en el pozo I y 121. Las celdas de flujo C10 a C14 (Figura 4), con los parámetros hidráulicos correspondientes (Tabla 2). Se estimó una intrusión de agua de mar de $1.73 Mm^3$.

Recarga vertical

Se calculó la recarga vertical a partir de un modelo de infiltración para la cuenca de La Paz (Figura 5) obtenido por Cruz et al. (2011), quien utilizó la ecuación general de balance hidrológico aplicada en un sistema de información geográfica (SIG). La generación de este modelo, aparte de utilizar datos de precipitación y temperatura, toma en cuenta el tipo y uso de suelo, así como la vegetación. Para obtener la infiltración en la zona de explotación acuífera ($200 km^2$), se sobrepuso este polígono sobre el modelo de infiltración a partir del cual se seleccionaron los pixeles que quedan dentro, se realizó la sumatoria, y se obtuvo un valor de $1.33 Mm^3$. Hay que tomar en cuenta que la zona donde se localiza el polígono de la zona acuífera de explotación no es homogénea, incluye parte de la ciudad de La Paz, caminos, calles, carretera, infraestructura, casas, etc., por lo que aproximadamente solo en un 47 % de esa superficie es posible que ocurra infiltración. Esto se confirma a partir del modelo de escurrimiento para la cuenca de La Paz (Cruz et al. 2011), donde se observa que en estas zonas existe un alto coeficiente de escurrimiento.

Balance hidrológico

Considerando los componentes de entrada y salida de un sistema, el balance hidrológico de agua subterránea se representa por la ecuación para acuíferos no confinados (Kommadath 2000, modificado por Cruz 2007), con lo que se calcula un cambio de almacenamiento Δa , para un periodo de tiempo.

$$\Delta a = (Rv + Rc + Rr + Ra + Rh) - (Et + Es + Ds + Ep) \quad (3)$$

Donde las entradas son :

Tabla 1. Parámetros hidráulicos para el cálculo de la recarga por flujo subterráneo al acuífero de La Paz.
Table 1. Hydraulic parameters for the calculation of groundwater flow recharge to the aquifer of La Paz.

Celda	Ancho celda (m)	Largo celda (m)	h1-h2 (m)	Gradiente Hidráulico h1-h2/largo	Conductividad hidráulica (m día ⁻¹)	Espesor capa acuífera (m)	Transmisividad CH*Espesor capa	Caudal (m ³ día ⁻¹) A*GH*T	Recarga (Mm ³ año ⁻¹)
C1	2910	400	2	0.005	0.25	146.54	36.635	533.039	0.19455
C2	3215	260	2	0.00769	1.4	130	182	4501	1.64286
C3	2170	320	2	0.00625	1.4	130	182	2468.375	0.90095
C4	2900	360	2	0.00555	1.4	130	182	2932.222	1.07026
C5	1900	445	2	0.00449	1.4	130	182	1554.157	0.56726
C6	2500	800	2	0.0025	0.36	182.93	65.854	411.592	0.15023
C7	1810	440	2	0.00454	0.36	182.93	65.854	541.805	0.19775
C8	1300	415	2	0.00481	0.36	182.93	65.854	412.584	0.15059
C9	1480	480	2	0.00416	5.8	17.38	100.804	621.624	0.22689
									$\Sigma = 5.10$

Tabla 2. Parámetros hidráulicos para el cálculo de la intrusión de agua de mar al acuífero de La Paz.
Table 2. Hydraulic parameters for the calculation of sea water intrusion to the aquifer of La Paz.

Celda	Ancho celda (m)	Largo celda (m)	h1-h2 (m)	Gradiente Hidráulico h1-h2/largo	Conductividad hidráulica (m día ⁻¹)	Espesor capa acuífera (m)	Transmisividad CH*Espesor capa	Caudal (m ³ día ⁻¹) A*GH*T	Recarga (Mm ³ año ⁻¹)
C10	1685	560	1	0.00178	3.025	81.69	247.112	743.543	0.27139
C11	1850	910	1	0.00109	3.025	81.69	247.112	502.371	0.18336
C12	2080	540	1	0.00185	3.025	81.69	247.112	951.839	0.34742
C13	2110	285	1	0.0035	3.025	81.69	247.112	1829.49	0.66776
C14	1850	640	1	0.00156	3.025	81.69	247.112	714.308	0.26072
									$\Sigma = 1.73$

R_v = recarga vertical por lluvias (infiltración). R_c = recarga proveniente de algún canal o río. R_r = recarga por riego. R_a = recarga artificial. R_h = recarga horizontal de alguna otra cuenca o acuífero las salidas son: E_t = evapotranspiración. E_s = escurrimiento superficial. D_s = descarga subterránea al mar, lago, río, manantial, u otro acuífero. E_p = explotación de pozos.

Todos los componentes de la ecuación son estimados utilizando información geohidrológica y/o meteorológica. Tomando en cuenta que el acuífero de La Paz es tipo libre, y además es un acuífero costero, se agrega a la ecuación la componente de entrada por intrusión marina (R_{im}), así mismo, se eliminan las componentes de entrada (R_c) ya que no existen canales ni ríos en la región; y de salida, las componentes de evapotranspiración (E_t) y escurrimiento superficial (E_s), que no se toman en cuenta por tratarse de un sistema subterráneo.

La ecuación resultante es:

$$\Delta a = (R_v + R_r + R_a + R_h + R_{im}) - (D_s + E_p) \quad (4)$$

Respecto a las entradas, R_v es la recarga vertical por lluvias estimada en 1.33 Mm^3 . La recarga por riego (R_r), se dividió en recarga por riego con agua de pozo en 2.53 Mm^3 , y recarga por riego con aguas tratadas en 0.58 Mm^3 , que fueron estimadas de las láminas de riego aplicadas en la zona agrícola de Los Bledales y en los poblados de El Centenario y Chametla, y de los volúmenes de agua de intercambio para riego de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de La Paz (CONAGUA 2010). A pesar de que la presa de La Buena Mujer fue construida con el propósito de control de avenidas y proveer recarga artificial al acuífero de La Paz, se desconoce el volumen de agua que descargaba ya que actualmente está detenido, por lo que no se considera la componente de recarga artificial (R_a). La recarga horizontal (R_h) estimada fue de 16.81 Mm^3 ; y la componente por intrusión marina (R_{im}) se estimó en 1.73 Mm^3 . En lo que respecta a las salidas, se supone que no existe descarga de agua subterránea (D_s) hacia el mar debido a la sobreexplotación del acuífero, por

lo que el flujo se ha invertido (CNA 1997; 1999), sin embargo existen pruebas de descarga en varias zonas a lo largo de la costa de la Ensenada de La Paz. Se sabe que los manglares están asociados a la presencia de agua dulce, la existencia de ellos es indicativo de descarga de agua subterránea en este cuerpo de agua (Lechuga et al. 2008). En base a esta relación, y por las mediciones de Radón (R_n^{222}) que han detectado la descarga de agua dulce en la Ensenada de La Paz (Lechuga com. pers.) se confirma este flujo subterráneo. La descarga de agua subterránea (D_s) fue estimada en 3.32 Mm^3 , por un método indirecto (Taniguchi et al. 2003), a partir de la infiltración de agua de lluvia en la cuenca de La Paz de $65 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, estimada por Cruz et al. (2011), la extracción de agua del acuífero (30.78), y un factor general de 10 % de descarga de agua subterránea (Taniguchi et al. 2002). El valor calculado de 3.32 Mm^3 es para todo el frente costero, desde el inicio de la barra de El mogote hasta la marina Palmira, con una longitud aproximada de 34.21 km; pero para el frente costero del acuífero, desde El centenario hasta El CICIMAR, con una longitud de 19.64 km, la descarga de agua subterránea (D_s) se calcula en $1.90 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$. El volumen de agua del acuífero La Paz concesionado para su extracción anual, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, al 30 de abril de 2002, es de 30.78 Mm^3 (CNA 2002). Se sabe que no todas las extracciones autorizadas tienen medidor, y también existen extracciones no autorizadas o no contabilizadas, por lo que se cree que la extracción total anual es mayor a estos estimados. Para no caer en imprecisiones, se consideró adecuado tomar este volumen de extracción de agua de pozos (E_p) de 30.78 Mm^3 .

Resultados finales

Balance hidrológico

Se substituyeron los valores de las componentes en la ecuación (4):

$$\Delta a = (R_v + R_r + R_a + R_h + R_{im}) - (D_s + E_p)$$

Por tanto:

$$\Delta a = (1.33 + 3.11 + 0 + 16.81 + 1.73) - (1.90 + 30.78) = 22.98 - 32.68$$

$$\Delta a = -9.70 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$$

Intrusión marina

Debido al déficit estimado en el balance hidrológico del acuífero de La Paz, y una intrusión marina estimada en $1.73 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, se supone que el agua de mar (cuña marina) ha ido penetrando continuamente al acuífero de La Paz, por lo que se realizó un análisis de datos de sólidos totales disueltos (STD) del 2005, proporcionados por la CNA.

En el 2005, la CNA realizó la campaña más completa de muestreo y análisis de muestras de agua, con un total de 53 pozos. Para obtener la distribución, se interpolaron los datos, se generaron los contornos, y se crearon bandas de diferentes concentraciones de STD (Figura 6).

La banda A con concentraciones menores a 1000 ppm, representa la zona con agua dulce, con la mejor calidad de agua adecuada para consumo y uso humano; la banda B representa una zona de agua dulce-salobre, con concentraciones de entre 1000 a 1500 ppm; la zona C representa una zona de agua salobre con concentraciones de 1500 a 2500 ppm; y la zona E representa una franja de agua salobre-salada con concentraciones de 2500 a 5000 ppm, por lo que la mayoría de los pozos que se encuentran dentro de estos límites deben ser clausurados.

Tomando en cuenta el contorno de 2000 ppm, que se encuentra en medio de la banda C, se asume que el frente de la cuña marina en el acuífero de La Paz se encontraba a 6 km de la línea de costa en la parte oeste, y 5 km en la parte este de la zona acuífera (Figura 6), en el 2005.

DISCUSIÓN

El presente trabajo utiliza una combinación de métodos potenciales y reales para la estimación de la recarga (Bridget *et al.* 2002), así mismo, define e incluye en la ecuación de balance varias componentes que no se consideraron en otros estudios

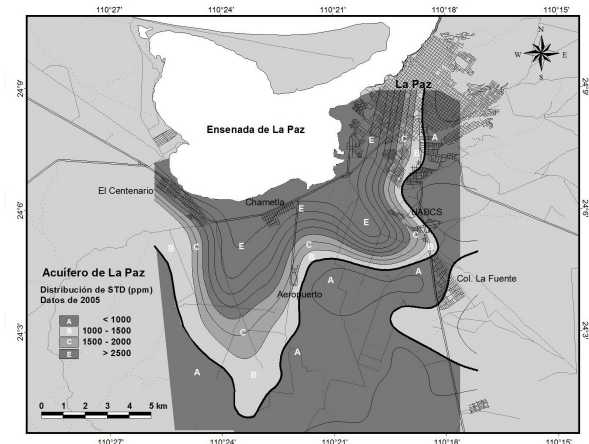


Figura 6. Esquema que muestra la distribución de concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) en el acuífero de La Paz. La zona E representa una franja de agua salobre-salada con concentraciones de 2500 a 5000 ppm.

Figure 6. Diagramme showing the distribution of total dissolved solids (TDS) concentrations in the acuífero of La Paz. Zone E represents a strip of brackish-salty water with concentrations of 2500 to 5000 ppm.

realizados en la misma zona (CNA 1999; CIGSA 2001; Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz BCS 2002; Dragoo & Maddock 2004), lo que lo hace más objetivo y completo. En la Tabla 3 se presentan los métodos de estimación de recarga utilizados por diferentes autores, los datos (años) utilizados, superficie acuífera, recarga vertical, horizontal o total, extracción por bombeo y el balance anual.

Este estudio, debido al método utilizado, incluye la componente de recarga por intrusión marina (Rim), recarga por riego (Rr) y la de descarga subterránea (Ds). Solo el estudio de CIGSA (2001) consideró la recarga por intrusión marina.

El balance anual obtenido por CIGSA 2001, Ordenamiento ecológico Bahía de La Paz BCS 2002, y el presente estudio, resultó muy similar (Tabla 3). CIGSA (2001) a pesar de que incluye la mayoría de las componentes de la ecuación de balance, la superficie acuífera utilizada es menor, lo que eleva el valor de la recarga total anual por km^2 , pero asume una extracción por bombeo ligeramente mayor, que resulta en un balance de 9.90 Mm^3 . El estudio para el Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz BCS (2002) utiliza el método de coeficiente de infiltración, que es un método empírico para estimar recarga de una manera rápida (Sánchez 2005) que lo hace poco confiable.

Tabla 3. Comparación de diferentes estudios de las estimaciones de recarga y balance hidrológico en el acuífero de La Paz.
Table 3. Comparison of recharge estimations and hydrological balances recorded for the aquifer of La Paz by different studies.

Fuente	Método utilizado	Datos (Años)	Superficie acuífera (km ²)	Recarga vertical (Mm ³)	Recarga horizontal, Rr y Rim(Mm ³)	Recarga Total anual (Mm ³)	Recarga Total anual (Mm ³ km ² -1)	Extracción por bombeo y descarga subterránea (Mm ³)	Balance anual (Mm ³)
CNA 1999	Balance hidrológico	745	115	26.98	0.77	27.75	0.2413	-28.33	-0.58
CIGSA 2001	Flujo subterráneo	2000	155	4.95	Rh = 8.46 Rim = 8.49	21.9	0.14129	-31.8	-9.9
Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz 2002	Coefficiente de infiltración	1970-2000 (31)	515			20.13	0.039	-29.11	-8.98
Dragoo y Madoock 2004	Maxey-Eakin, 1949. Flujo subterráneo	1985-2000	600			10	0.016	-30	-20
Este estudio	subterráneo/ Balance hidrológico	2004	200	1.33	Rh = 16.81 Rr = 3.11 Rim = 1.73	22.98	0.1149	-30.78 Ds = -1.9	-9.70

La superficie acuífera es muy amplia por lo que se obtiene un valor muy bajo de la recarga total anual por km², asume una extracción por bombeo ligeramente menor, que resulta en un balance de -8.98 Mm³, similar a los estudios mencionados.

Los estudios de balance hidrológico en el acuífero de La Paz que presentan resultados más afines, son el presente trabajo y el de CIGSA (2001), seguramente porque utilizaron el método de flujo subterráneo y balance hidrológico con datos piezométricos de pozos dentro de un área acuífera definida, a pesar de que CIGSA (2001) no considera las componentes de descarga subterránea y recarga por riego. Sin embargo, existe una diferencia notable en el volumen estimado de recarga por intrusión marina entre ambos trabajos (Tabla 3).

Todas las estimaciones realizadas, cada una con sus propios criterios, diferentes métodos y superficies acuíferas, ofrecen una contribución al conocimiento del balance hidrológico del acuífero de La Paz. Es importante notar que en todas ellas se destaca que la extracción es mayor a la recarga por lo que el acuífero está sobreexplotado, de ahí que es necesario tomar medidas para conservarlo.

A manera de conclusión, la recarga total de agua dulce estimada para la zona acuífera de explotación con una superficie de 200 km² (año 2004), es de 22.98 Mm³ año⁻¹, de este volumen, 1.73 Mm³ es de intrusión marina. Con una extracción de agua del acuífero de 30.78 Mm³ año⁻¹ (concesiones inscritas en el REPGA en 2002) se estimó el balance, con un déficit de 9.70 Mm³ año⁻¹.

Debido al déficit de agua dulce del acuífero de La Paz, producto de su sobreexplotación, el agua

de mar ha penetrado aproximadamente 6 km en el lado oeste y 5 km en el lado este (en el 2005), y se supone que continúa avanzando debido a una mayor demanda de agua por el incremento en la población de la ciudad de La Paz, y por falta de otras fuentes de abastecimiento.

Para la sustentabilidad y conservación del acuífero de La Paz es necesario disminuir la sobreexplotación para reducir la contaminación por intrusión marina, por lo que es urgente tomar medidas para detener este problema. De continuar con el mismo escenario, sin tomar las medidas adecuadas de conservación y contemplar otras alternativas de abastecimiento de agua para la ciudad de La Paz, como por ejemplo, hacer más eficiente el tratamiento de agua residuales, reparar la red de distribución de agua potable por la pérdida que se tiene en fugas, proveer recarga artificial al acuífero por medio de la construcción de diques o bordos para retener el agua de lluvia que escurre al mar, e instalar una planta desalinizadora, en un futuro cercano el acuífero sufrirá un daño irreversible y la población se verá gravemente afectada por la escasez de agua potable.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. José Luis Meza Trejo de la CNA, ahora CONAGUA, por proporcionar datos piezométricos e información geohidrológica del acuífero de La Paz. A los técnicos Juan E. Vega Mayagoitia y Álvaro González Michel (Laboratorio de Hidrología e Irrigación del CIBNOR), por el manejo y análisis de los de datos geohidrológicos.

LITERATURA CITADA

- Álvarez AA, Rojas SH, Prieto MJ (1997) Geología de la bahía de La Paz y áreas adyacentes. En: Urbán RJ, Ramírez RM (ed) La Bahía de La Paz, Investigación y Conservación. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. pp. 13-29
- Bridget RS, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- Canales GA, Islas LI (2005) Disponibilidad sostenible de agua subterránea a partir del control de las descargas de un acuífero. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 1: 41-48.
- Castany G (1971) Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ed. Omega, Bar., España. 671 pp.

- CIGSA (Consultores en Ingeniería Geofísica SA de CV) (2001) Estudio de caracterización y modelación de la intrusión marina en el acuífero de La Paz BCS. 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, BCS. Informe final, Contrato GAS-026-PR097 para ADI Construcciones S.A. de C.V. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. 173 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua) (1999) Documento de respaldo para la publicación de la disponibilidad. Acuífero BCS.-24 La Paz. Gerencia Regional de la Península de Baja California, Mexicali, B.C. 17 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua) (2002) Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de La Paz, Estado de Baja California Sur. Dirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. 18 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua) (2005) Estudio para actualizar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales en las 85 (ochenta y cinco) subregiones hidrológicas de las 7 (siete) regiones hidrológicas 1,2,3,4,5,6 y 7 de la península de Baja California, mediante la aplicación de la NOM-011-CNA-2000. 75 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 FA (2007) Caracterización y diagnóstico del acuífero de La Paz BCS. Mediante estudios geofísicos y geohidrológicos. Tesis de Doctorado, IPN-CICIMAR. 139 pp.
- Cruz FA, Vázquez GR, Ramírez HJ, Nava SEH, Troyo DE, Rivera RJ, Vega MJE (2011) Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, BCS. *Universidad y Ciencia* 27(3): 251-263.
- Davis SN, Wiest DR (1971) *Hidrogeología*. Ed. Ariel, Barcelona 563 p.
- Davisson ML, Rose TP (2000) Maxey-Eakin methods for estimating groundwater recharge in the fenner watershed, southeastern California. U.S. Department of Energy. University of California. 13 pp.
- Dragoo LC, Maddock T (2004) Hydrology model for the alternative futures of La Paz. University of Arizona, Dept. of Hidrology and Water Resources. 16 pp.
- Egboka B, Infor B, Banlanjo E (2006) Water budget analysis of Agulu Lake in Anambra State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 10(3): 27-30.
- Escolero O, Torres-Onofre S (2007) Análisis de la intrusión de agua de mar en el acuífero de La Paz (México). *Boletín Geológico y Minero* 118 (Número Especial): 637-648.
- Fikos I, Ziankas G, Rizopoulou A, Famellos S (2005) Water balance estimation in Anthemountas river basin and correlation with underground water level. Selected from papers presented in 9th. International Conference on Environmental Science and Technology. Greece. *Global NEST Journal* 17(3): 354-359.
- Flores-Márquez EL, Campos-Enríquez JO, Chávez-Segura RE, Castro García JA (1998). Salt intrusion of the Costa de Hermosillo aquifer, Sonora, México: A numerical simulation. *Geofísica Internacional* 37(3): 113-151.
- Freeze AR, Cherry JA (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, U.S.A. 604 pp.
- Hausback B P (1984) Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. In Frizzell, V. A., Jr., ed., *Geology of the Baja California Peninsula*, Pacific Section, Soc. of Economic Paleontologists and Mineralogists. Los Angeles, Cal. U.S.A. V. 39, pp. 219-236.

- Henry HR (1959) Salt intrusion into fresh-water aquifer: *Journal of Geophysic Research* 64(11): 1911-1919.
- Johannes RE, Hearn CJ (1985) The effect of submarine groundwater discharge on nutrient and salinity regimes in a coastal lagoon off Perth, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 21: 251-264.
- Kommadath A (2000) Estimation of natural groundwater recharge. *Groundwater and Hydrogeology*. Section 7, paper 5. 7 pp.
- Katpatal YB, Dube YA (2004) Geospatial data integration for groundwater recharge estimation in hard rock terrains. Department of Civil Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology. Maharashtra State, India. 10 pp.
- Lechuga DC, Arreola LA, Bustillos GJ, Cruz FA, Chávez LS, López CD, Mendoza SR, y Morquecho EML (2008) Programa operativo anual 2008, Línea Estratégica COSTA. CIBNOR, S.C. 8 pp.
- Lechuga DC. Com. pers. Investigador Titular, Programa de Planeación Ambiental y Conservación de CIBNOR, La Paz BCS.
- Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz BCS (2002) IPN-CICIMAR (Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas); CIBNOR (Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste); UABCS (Universidad Autónoma de Baja California Sur). Informe, Abril 2002. 466 pp.
- Rangel-Medina, Monreal SR, Morales MM, Castillo GJ (2004) Estimation of the vulnerability to saline intrusion of the coast of Hermosillo aquifer, Sonora, México. *Geofísica Internacional* 43(4): 611-621.
- SARH-CNA (1991) Sinopsis geohidrológica del estado de Baja California Sur. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión Nacional del Agua. Contrato No. AC-SH-88-06, Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas. 85 pp.
- Sánchez FJ (2005) Evapotranspiración. Departamento de Geología Universidad de Salamanca, España. 8 pp.
- Sophocleous MA (1991) Combining the soilwater balance and water-level fluctuations methods to estimate natural groundwater recharge: Practical Aspects. *Journal of Hydrology* 124: 229-241.
- Steinitz CR, Faris MF, Vargas-Moreno JC, Canfield T, Arizpe O, Angeles M, Cariño M, Santiago F, . Maddock T, Dragoo C, Baird K, Godínez L (2005). Alternative futures for the region of La Paz, Baja California Sur, Mexico. Harvard University, Cambridge, MA USA 02138. Feb. 2005. 37 p.
- Taniguchi M, Burnett WC, Cable JE, Turner JV (2002) Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Processes* 16: 2115-2129.
- Tinajero GJA (1982). Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología). Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México, D.F. 232 pp.
- UABCS (Universidad Autónoma de Baja California Sur) (1986). Estudio geohidrológico complementario de las cuencas La Paz-El Carrizal, para proporcionar agua en bloque a la ciudad de La Paz, BCS. Con participación de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y la Universidad Autónoma de México (UNAM). UABCS, La Paz BCS. 334 pp.