

Estimación de algunas propiedades geohidrológicas en un conjunto de pozos de monitoreo en el Valle de Mexicali, B.C., México

Estimation of some geohydrological properties in a set of monitoring wells in Mexicali Valley, B.C., Mexico

Fuentes-Arreazola, M. A.^{a1}, Vázquez-González, R.^{a2}

^aDepartamento de Geofísica Aplicada, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, (México). E-mail: ^{a1}mfuentes@cicese.edu.mx, ^{a2}rvazquez@cicese.mx,

Recibido: 25/11/2015

Aceptado: 08/04/2016

Publicado: 29/04/2016

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar la respuesta del nivel del agua relacionada a las variaciones de presión barométrica y a la acción de la marea terrestre teórica, en un conjunto de pozos de monitoreo en el Valle de Mexicali, se plantean e implementan técnicas de análisis en los dominios del tiempo y la frecuencia para obtener como resultado del cálculo de funciones de transferencia y análisis de armónicos, valores de eficiencia barométrica y de sensibilidad a la marea terrestre con los cuales, bajo condiciones de respuesta confinada–estática teórica, fue posible obtener estimaciones de algunas propiedades geohidrológicas y geofísicas como: porosidad, almacenamiento específico, y compresibilidad. En cinco pozos considerados en este trabajo se obtuvieron estimaciones de las propiedades del acuífero en un estado previo y posterior a un sismo. Este trabajo ha permitido un mejor conocimiento de los parámetros que controlan los procesos que suceden en la zona de estudio.

Palabras clave | Nivel del agua; Presión barométrica; Marea terrestre; Propiedades geohidrológicas.

ABSTRACT

With the aim of studying the response of the water level related to variations in barometric pressure and the action of theoretical Earth tide, in a set of monitoring wells in the Mexicali Valley; are propose and implement analysis techniques in the time and frequency domain to obtain as result from the calculation of transfer functions and harmonic analysis, values of barometric efficiency and sensitivity to Earth tide, with which under conditions of theoretical static-confined response, was possible to obtain estimates of some geohydrological and geophysical properties as: porosity, specific storage, and compressibility. In five wells considered in this paper were obtained estimates of the properties of the aquifer in a state before and after an earthquake. This work has enabled a better understanding of the parameters that control the processes that occur in the study area

Key words | Water level; Barometric pressure; Earth tide; Geohydrological properties.

INTRODUCCIÓN

Registros de la variación del nivel del agua subterránea en pozos de monitoreo, son utilizados generalmente para estudiar la evolución del almacenamiento en el acuífero, determinar el gradiente hidráulico y así poder definir la dirección de flujo en la zona de estudio; sin embargo, en la práctica se ha observado que las variaciones del nivel del agua se correlacionan con diversos fenómenos naturales y/o antropogénicos. Algunos de estos fenómenos son los responsables de inducir esfuerzos que provocan la deformación de las estructuras que conforman el acuífero, su acción a menudo se ve reflejada en las variaciones del nivel del agua en pozos de observación. El análisis de la variación del nivel del agua es una herramienta que brinda información de las características del subsuelo, permitiendo estimar algunos parámetros geohidrológicos y geofísicos.

Los fenómenos asociados a la presión barométrica y a la marea terrestre o marea gravitacional, son las dos principales cargas continuas actuando sobre un sistema pozo-acuífero. Cuando el acuífero se encuentra en un estado perfectamente confinado, presenta alta permeabilidad lateral y el diámetro del pozo es suficientemente pequeño, las fluctuaciones del agua dentro del pozo relacionadas a variaciones de la presión atmosférica y marea terrestre, pueden ser expresadas mediante una constante: eficiencia barométrica y sensibilidad a la marea, respectivamente. Estos parámetros pueden ser obtenidos utilizando métodos de ajuste por mínimos cuadrados y posteriormente ser empleados para estimar algunas propiedades de los materiales del acuífero (Jacob, 1940; Roeloffs, 1988; Rojstaczer y Agnew, 1989; Rahi y Halihan, 2009). Sin embargo, la mayoría de los sistemas pozo-acuífero no son perfectamente confinados o presentan condiciones de acuífero no confinado, por lo cual una constante suele no ser suficiente para describir la respuesta del nivel del agua en un pozo por efecto de la marea terrestre y la presión barométrica (Rojstaczer, 1988a; 1988b; Rojstaczer y Riley, 1990).

Registros de variaciones de la presión barométrica y de marea gravitacional teórica, pueden ser utilizados como señales de entrada al sistema pozo-acuífero, mientras que las fluctuaciones de nivel del agua, corresponden a la señal de salida; siendo las propiedades de los materiales que conforman el acuífero los responsables de modular la respuesta. Cuando la respuesta del nivel del agua dentro de un pozo debida a una deformación que se extiende en una gran superficie de terreno, ocurre bajo condiciones donde el efecto de almacenamiento en pozo, ni el drenado de la superficie freática son importantes, las variaciones del nivel del agua reflejaran la respuesta en condiciones no - drenadas de la formación, conocida como respuesta confinada-estática teórica (Rojstaczer y Agnew, 1989).

Mucho del trabajo que se ha desarrollado se ha enfocado análisis de registros del nivel del agua empleando la respuesta confinada-estática teórica, sin embargo, esta respuesta no siempre se observa en un pozo de monitoreo. Adicionalmente, esta respuesta sólo considera un rango del espectro de frecuencias que permanece relativamente estable, omitiendo el contenido de baja y alta frecuencia. Siendo que la respuesta a la deformación de alta frecuencia se correlaciona con el efecto de almacenamiento en pozo; mientras que la deformación de baja frecuencia es influenciada por el movimiento de la superficie freática. Aunado a lo anterior, la respuesta de un acuífero con un nivel freático muy somero no ha sido reportada.

El propósito de este estudio fue analizar la respuesta del nivel del agua subterránea en cinco pozos de monitoreo del acuífero superficial en el Valle de Mexicali, B. C., México, ante la influencia de fluctuaciones de presión atmosférica y marea gravitacional, principalmente. Varias suposiciones fueron hechas con la finalidad de plantear una aproximación a la respuesta confinada estática-teórica, y poder estimar algunos parámetros geohidrológicos y geofísicos, ante condiciones previas y posteriores a un evento sísmico de magnitud moderada, con el objetivo de evaluar la variación de los parámetros de un estado a otro. Además, este trabajo permitió obtener valores de parámetros geohidrológicos en la zona de estudio sin tener que realizar estudios invasivos en campo como pruebas de aforo. Se espera que información de este estudio pueda ser útil para lograr un mejor conocimiento de las propiedades del subsuelo y su influencia en los procesos que ocurren en el Valle de Mexicali.

MATERIAL Y MÉTODOS

El análisis de registros del nivel del agua en pozos de monitoreo del sistema pozo-acuífero, considera dos fenómenos diferentes pero relacionados entre sí: a) fluctuaciones del nivel del agua debidas a la marea terrestre, y b) fluctuaciones del nivel del

agua debidas a variaciones de la presión barométrica. La marea terrestre actúa directamente sobre la matriz de los materiales que conforman el acuífero, por lo que la respuesta del nivel del agua dentro de un pozo a la acción de la marea terrestre es controlada principalmente por las propiedades elásticas de la matriz porosa; mientras que, la presión barométrica actúa en la superficie libre del agua dentro del pozo y en la superficie del terreno de manera simultánea (Bredehoeft, 1967; Van Der Kamp y Gale, 1983; Rojstaczer y Agnew, 1989); la Figura 1 ilustra estos mecanismos actuando en una sección de acuífero idealizado.

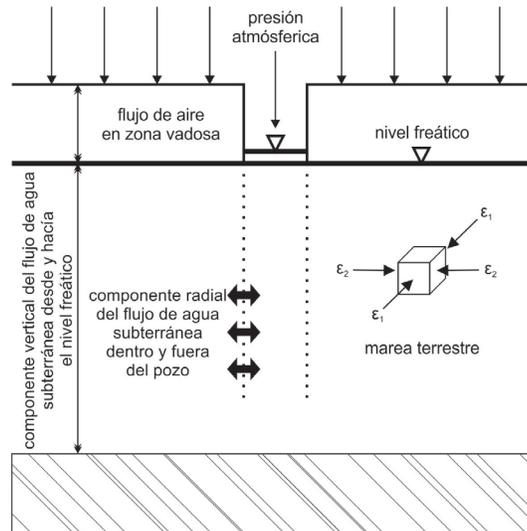


Figura 1 | Sección idealizada de un pozo perforado en un acuífero no-confinado mostrando la respuesta a la marea terrestre y la presión atmosférica, modificado de (Rojstaczer y Riley, 1990).

De manera general, para el sistema pozo-acuífero, la presión barométrica y la marea terrestre son dos señales de entrada dependientes a ciertas frecuencias, siendo las variaciones del nivel del agua dentro del pozo la señal de salida, modulada por las propiedades de los materiales que conforman el acuífero. La respuesta en frecuencia, eficiencia barométrica y sensibilidad a la marea terrestre, corresponde al módulo de las funciones de transferencia, y describen el comportamiento de estos parámetros a través del rango de frecuencias analizado. El cálculo de la función de transferencia requiere primeramente la estimación de la función de coherencia, Γ_{xy}^2 , entre el nivel del agua, la presión barométrica y la marea terrestre; la función de coherencia mide el grado de correlación entre las series y permite identificar frecuencias dominantes. La función de coherencia está definida por:

$$\Gamma_{xy}^2 = \frac{|G_{xy}(\omega)|^2}{G_{xx}(\omega)G_{yy}(\omega)} \tag{1}$$

donde $G_{xx}(\omega)$ y $G_{yy}(\omega)$ son la función de densidad espectral de potencia de cada una de las dos señales, y $G_{xy}(\omega)$ es la función de densidad espectral de potencia cruzada entre ambas señales.

Las funciones de transferencia de la respuesta del nivel del agua a la presión barométrica y marea terrestre se obtienen planteando y resolviendo el siguiente sistema complejo de ecuaciones (Bendat y Piersol, 1986; Rojstaczer, 1988a; 1988b):

$$\begin{vmatrix} BB & BT \\ TB & TT \end{vmatrix} \begin{vmatrix} HB_A \\ HT_A \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} BA \\ TA \end{vmatrix} \tag{2}$$

donde BB y TT son la función de densidad espectral de potencia de la presión barométrica y marea terrestre, respectivamente; BT es la función de densidad espectral de potencia cruzada entre la presión barométrica y la marea terrestre; TB es su complejo conjugado; BA y TA son la función de densidad espectral de potencia cruzada entre la presión barométrica y el nivel del agua, y la marea terrestre y el nivel del agua, respectivamente; HB_A y HT_A son la función de transferencia de la respuesta del nivel del agua a la presión barométrica y marea terrestre, respectivamente.

Por otro lado, un análisis del sistema pozo-acuífero en respuesta a la presión barométrica y marea terrestre puede ser planteado considerando la acción desacoplada de cada fenómeno. Con base en lo anterior, es posible estimar una función de transferencia para el nivel del agua ante la influencia de la presión atmosférica, HB_D ; definida como la relación entre la función de densidad espectral de potencia cruzada de la presión barométrica y el nivel del agua, $G_{bw}(\omega)$, y la función de densidad espectral de potencia de la presión barométrica, $G_{bb}(\omega)$:

$$HB_D = \frac{G_{bw}(\omega)}{G_{bb}(\omega)} \quad (3)$$

La respuesta del nivel del agua subterránea a la acción de la marea terrestre; al ser este un fenómeno de gran escala, interacción de cuerpos celestes, resulta en un proceso complejo, alrededor de 386 armónicos generan su efecto, sin embargo, se ha observado que son cinco los principales, responsables del 95% de su potencial y variabilidad; y que son, componentes diurnas: O_1 y K_1 ; y componentes semi-diurnas: N_2 , M_2 y S_2 . Estrictamente hablando, fluidos en el subsuelo responden a un campo tri-dimensional de esfuerzos, sin embargo, este campo de esfuerzos no es conocido a priori; por lo que resulta conveniente analizar la respuesta del nivel del agua a un campo bi-dimensional de esfuerzos (horizontales), ε_a ; actuando en una superficie definida; y que se reporta en unidades de *nano-strain* ($n\varepsilon = 10^{-9}$ m). Asumiendo que el campo de esfuerzos inducido por la marea terrestre calculado de forma teórica, difiere del real, sólo por el efecto de discontinuidades locales (Berger y Beaumont, 1976). Amplitud y fase de las componentes, se estiman mediante ajuste del registro del nivel del agua y el campo de esfuerzos, expresado como una suma de funciones seno y coseno usando técnicas de regresión de mínimos errores cuadrados:

$$x(t_j) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(2\pi\omega_k t_j) + b_k \sin(2\pi\omega_k t_j) + R_j \quad (4)$$

donde $x(t_j)$ es la observación del nivel del agua reducida, al tiempo t_j ; t_j es el tiempo en el punto j ; R_j es el residual entre dato observado y calculado en el punto j ; N es el número de constituyentes usados; ω_k es la frecuencia del k -ésimo constituyente de la marea terrestre; a_k y b_k son coeficientes de regresión; utilizados para calcular la amplitud, A_k , y la fase, φ_k :

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (5)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1}\left(-\frac{b_k}{a_k}\right) \quad (6)$$

Determinación de algunas propiedades del acuífero

Basados en las relaciones constitutivas de esfuerzo-deformación para un medio poro-elástico (Rice y Cleary, 1976); y considerando la ausencia de flujo desde y hacia la superficie freática y pozo, la respuesta del nivel del agua a presión barométrica y marea terrestre es debida a la deformación del acuífero en condiciones de no drenaje, es decir, condiciones de confinamiento-estático, Rojstaczer y Agnew, (1989) derivaron la relación del nivel del agua, w , ante la acción del campo de esfuerzo, ε_a , conocida como sensibilidad a la deformación bi-dimensional, A_s , dada por:

$$A_s = \frac{w}{\varepsilon_a} = \frac{(1-2\nu_u)B}{\rho g \beta (1-\nu_u)} \approx \frac{A_k}{A_t} \quad (7)$$

donde B es el coeficiente Skempton expresado por:

$$B = \frac{(\beta - \beta_u)}{(\beta - \beta_u) + \varphi(\beta_f - \beta_u)} \quad (8)$$

donde β es la compresibilidad de las rocas en condiciones drenadas, y dada por:

$$\beta = \beta(1 - \alpha B) \quad (9)$$

donde α es un coeficiente adicional del medio (Nur y Byerlee, 1971), y es usado para estimar el módulo de Poisson bajo condiciones de drenado, ν_u , (Rice y Cleary, 1976), y es dado por:

$$\alpha = 1 - \frac{\beta_u}{\beta} \quad (10)$$

$$\nu_u = \frac{3\nu + \alpha B(1 - 2\nu)\alpha}{3 - \alpha B(1 - 2\nu)\alpha} \quad (11)$$

De las anteriores ecuaciones: ν es el módulo de Poisson; ρ es la densidad del fluido; g es la aceleración debida a la gravedad; β es la compresibilidad de la matriz en condiciones drenadas; β_u es la compresibilidad de la matriz porosa en condiciones no drenadas; φ es la porosidad del acuífero; β_f es la compresibilidad del fluido.

La eficiencia barométrica bajo condiciones confinadas estáticas se expresa como, (Roeloffs, 1988):

$$EB = 1 - \frac{B(1 + \nu_u)}{3(1 - \nu_u)} \quad (12)$$

Calculando EB y A_s , y asumiendo valores para ν y β_u , podemos combinar las Ecuaciones (7 a 12) para estimar algunas propiedades de los materiales que conforman el acuífero, Ecuaciones (13 a 15), (Igarashi y Wakita, 1991):

$$\beta = \frac{1 - EB}{EB} \left(\frac{3}{2\rho g A_s (1 - \nu)} - \beta_u \right) \quad (13)$$

$$B = \frac{\rho g A_s \beta}{1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u)} \quad (14)$$

$$\varphi = \frac{(\beta - \beta_u)(1 - B)}{B(\beta_f - \beta_u)} \quad (15)$$

Y el almacenamiento específico unidimensional, S_s , calculado según (Rojstaczer y Agnew, 1989):

$$S_s = \rho g \alpha \beta \left[1 - \frac{2\alpha(1 - 2\nu)}{3(1 - \nu)} \right] + \rho g \alpha \beta \varphi (\beta_f - \beta_u) \quad (16)$$

Descripción del área de estudio

El Valle Mexicali se ubica al noreste de la península de Baja California, en la zona fronteriza de México y Estados Unidos de América; tiene como principales actividades económicas la agricultura y la generación de energía eléctrica, mediante el aprovechamiento de la canalización del Río Colorado y del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), respectivamente.

Fisiográficamente el Valle de Mexicali se ubica en la cuenca de Salton, que se relaciona con el sistema de fallas transcurrentes de San Andrés–Golfo de California, y representa el límite entre las placas tectónicas del Pacífico y Norteamérica. A escala local, el escalonamiento de las fallas Cucapá, Cerro Prieto e Imperial ha originado una cuenca de hasta 5000 metros de profundidad. El relleno sedimentario se ha dividido en dos unidades: sedimentos consolidados y sedimentos no-consolidados, separados por una zona de muy baja permeabilidad. En las areniscas presentes en la unidad consolidada se encuentra el reservorio geotérmico. La unidad de sedimentos no-consolidada se conforma principalmente por arenas finas a gruesas con intercalaciones de gravas, arcillas y limo, de espesor variable de 400 a 2500 metros; siendo en esta unidad donde se ubica la formación acuífera de flujo libre del Valle de Mexicali (Álvarez-Rosales, 1999).

Dominan tres paleo-ambientes de depositación: a) facies de planicie deltaica en la parte oriental, constituidas por arenas y gravas; b) facies de ambiente lagunar hacia la porción central con predominancia de arcillas y limos; c) facies distales de abanicos aluviales desde el límite oeste de la zona de lodos hasta la Sierra Cucapá, compuestas por arenas gruesas, grava y cantos rodados. Vázquez-González (1999) señaló que desde el punto de vista geohidrológico, se puede sintetizar que el acuífero superficial presente en el Valle de Mexicali es: un acuífero tipo libre no homogéneo, de espesor variable, ubicado en una secuencia de sedimentos mayormente de origen deltaico, con intercalaciones de materiales con distinta permeabilidad, lo que genera situaciones locales de confinamiento, pero que en conjunto, se comporta como una misma unidad geohidrológica.

Datos y procesamiento

Se instrumentaron un conjunto de pozos de monitoreo en el Valle de Mexicali con transductores de presión de registro continuo, Solinst Levellogger y Barologer, durante los años 2003 a 2008; para este estudio se han considerado cinco de estos pozos con registro del nivel del agua a cada cinco minutos, entre el 27 de abril y 19 de junio de 2006 (≈ 83 días), se eligió este intervalo con base en el interés de analizar las condiciones del nivel del agua subterránea y algunas propiedades del acuífero en un estado previo y posterior a un evento sísmico de magnitud moderada: $M_w = 5.4$ (magnitud de momento), acontecido el 24 de mayo de 2006 (04:20 UTC), con epicentro en las inmediaciones del área de estudio.

La Figura 2 muestra la distribución espacial de los pozos considerados, además de los principales aspectos geohidrológicos y geológicos; en la Tabla 1 se enlistan algunas características de estos pozos.

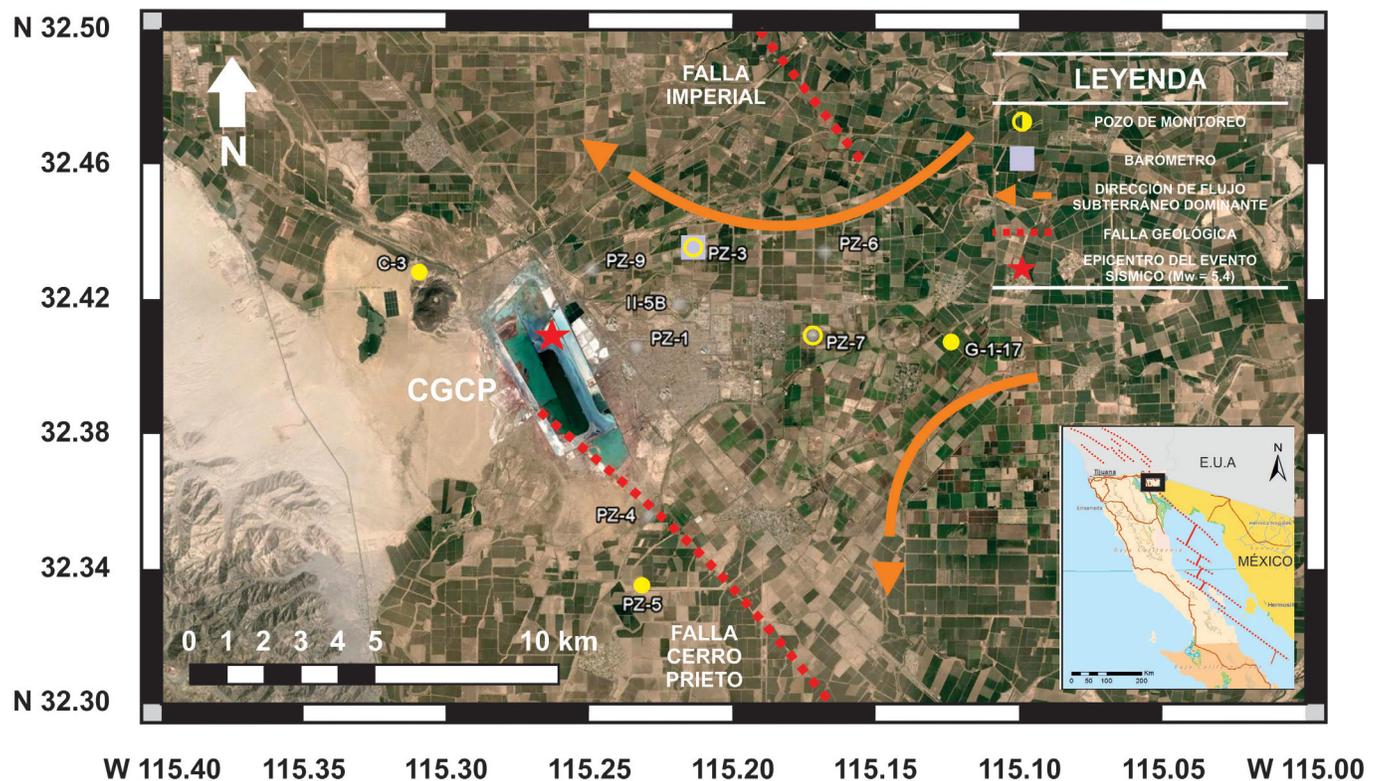


Figura 2 | Ubicación general de la zona de estudio; distribución espacial de los pozos de monitoreo considerados; predominante condición de flujo subterráneo; rasgos geológicos principales y localización del evento sísmico. Círculos rellenos y vacíos indican incremento o descenso co-sísmico en el nivel del agua, respectivamente.

Tabla 1 | Características generales de los cinco pozos instrumentados con transductores de presión en el Valle de Mexicali.

| Número y Clave Pozo | Ubicación [NAD-27] | | Profundidad Perforación (m) | Elevación Brocal (msnm) | Profundidad Nivel de Agua (m) | Elevación Nivel del Agua (msnm) |
|---------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | Latitud (°) | Longitud (°) | | | | |
| 1.- C - 03 | 32.4261 | -115.3102 | 201 | 13.38 | 10.71 | 2.67 |
| 2.- PZ - 03 | 32.4342 | -115.2140 | 159 | 11.40 | 3.10 | 8.30 |
| 3.- PZ - 05 | 32.3332 | -115.2318 | 147 | 12.34 | 8.57 | 3.77 |
| 4.- PZ - 07 | 32.4078 | -115.1724 | 171 | 12.76 | 2.27 | 10.49 |
| 5.- G - 117 | 32.4059 | -115.1724 | 200 | 16.20 | 4.81 | 11.39 |

Se calculó el campo de esfuerzo inducido por la marea terrestre teórica, para cada uno de los pozos de monitoreo utilizando el programa “SPOTL” (Berger *et al.*, 1987; Agnew, 2012), sin considerar la marea oceánica, utilizando un modelo de tierra homogénea y sin discontinuidades geológicas o topográficas.

El registro del nivel del agua subterránea, presión barométrica, deformación del área de estudio impuesta por la marea terrestre y la actividad sísmica en las inmediaciones del pozo con clave C-03 se muestra en la Figura 3.

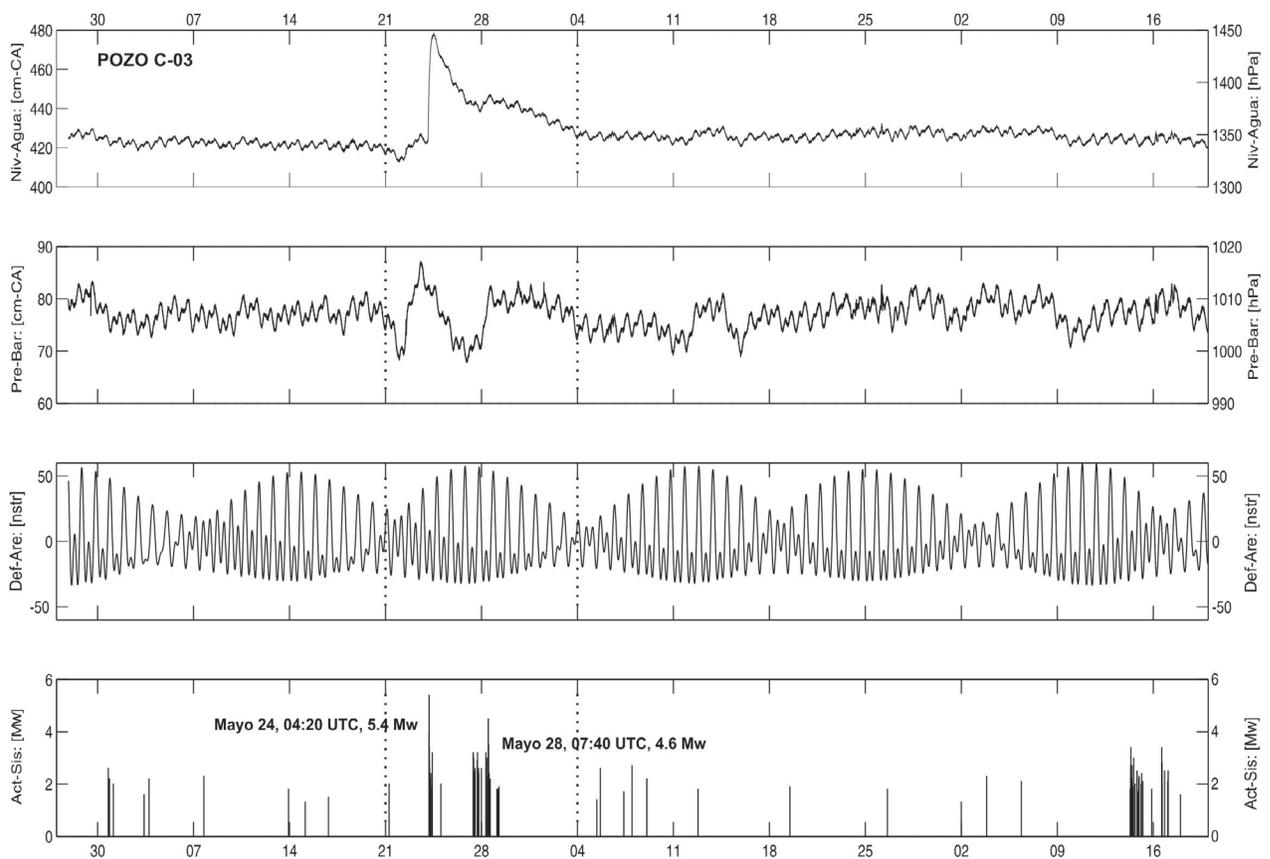


Figura 3 | Nivel del agua dentro del pozo con clave C-03 en el intervalo de análisis del 27 de abril al 19 de junio, presión atmosférica, deformación impuesta por la marea terrestre y actividad sísmica para el mismo periodo. El registro del nivel del agua muestra la columna de agua en centímetros por encima del sensor, y su equivalencia en hecto-pascales, referenciados a la superficie del terreno; igualmente la presión barométrica; la deformación impuesta por la marea terrestre se reporta en nano-strain (10^{-9} m). Con línea discontinua se definen las secciones de los registros analizados previa y posterior al evento sísmico.

Con el fin de comparar las estimaciones de las propiedades geohidrológicas y geofísicas de los materiales que conforman el acuífero en las inmediaciones de cada pozo, y asociando una variación al efecto de un evento sísmico, se definieron secciones previas y posteriores al sismo considerado. Las series de tiempo resultantes se analizaron en el dominio de la frecuencia para determinar las funciones de transferencia entre el nivel del agua y la presión barométrica y marea terrestre teórica, primeramente de manera acoplada; y después de forma desacoplada entre el nivel del agua y la presión atmosférica.

Se definieron tres bandas de frecuencia de interés: 1) $f < 0.5$ ciclos por día, cpd, banda de frecuencias bajas, la acción de fenómenos de escala regional de la presión barométrica influyen fuertemente en el sistema pozo-acuífero, el efecto de la marea terrestre es mínimo, además se tiene influencia de flujo subterráneo regional; 2) $0.5 < f < 10$ cpd, banda de frecuencias intermedias, la incidencia de las componentes diurnas y semi-diurnas de la presión barométrica y la marea terrestre se conjuga para provocar la mayor variabilidad en los registros; 3) $f > 10$ cpd, banda de frecuencias altas, fluctuaciones rápidas de presión barométrica pueden inducir el efecto de almacenamiento en pozo, la respuesta asociada a la marea terrestre es despreciable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calculamos la función de coherencia entre el nivel del agua, la presión barométrica y el campo de esfuerzos generado por la marea terrestre, para cada uno de los pozos considerados en este estudio. En la Figura 4 se muestra la función de coherencia entre los datos correspondientes al pozo con clave C-03 para el segmento de serie previo al evento sísmico.

En la banda de frecuencias bajas ($f < 0.5$ cpd), se observa que el valor de coherencia entre el nivel del agua y la presión barométrica es bajo, inferior a 0.2, incrementando a valores de 0.8 conforme la frecuencia aumenta y se acerca al límite de la banda; la coherencia entre el nivel del agua y la marea terrestre es baja, menor a 0.2, ya que las componentes de la marea gravitacional en estas frecuencias son de amplitud mínima; la coherencia entre la presión barométrica y la marea terrestre es prácticamente nula, dado que ambos fenómenos son independientes. De forma general se observó el mismo patrón descrito, en el resto de los pozos, indicando que el fenómeno de mayor influencia para esta banda de frecuencias es la presión barométrica.

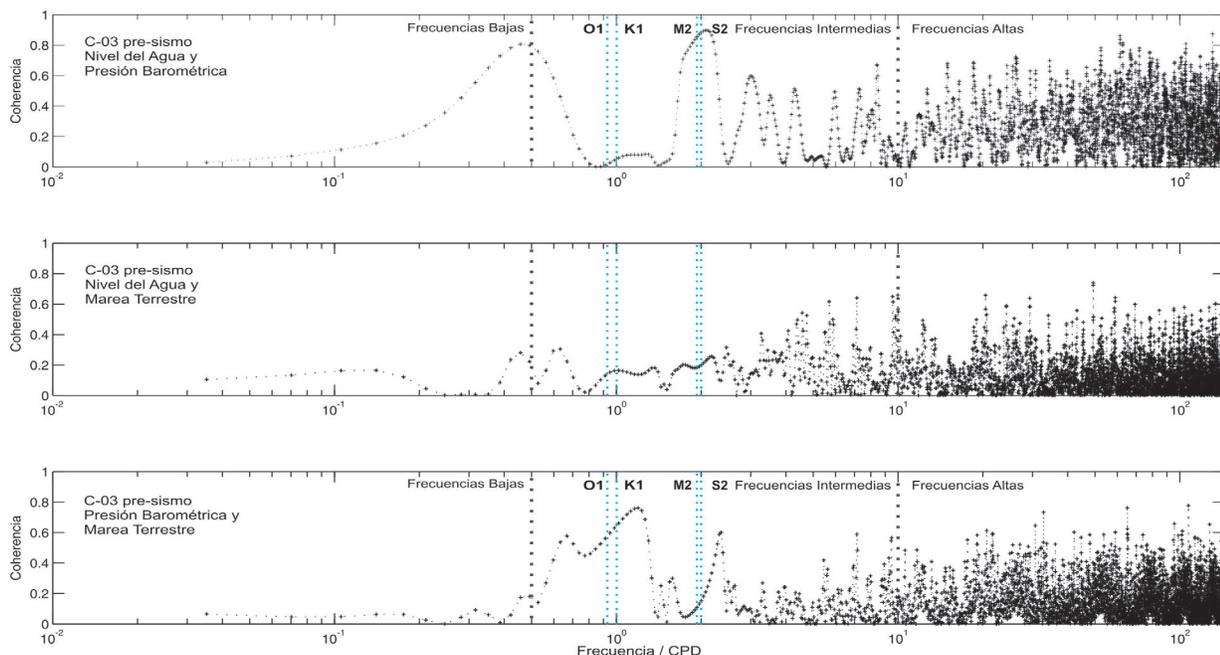


Figura 4 | Función de coherencia entre los registros considerados para el pozo con clave C-03 en la sección previa al evento sísmico; con línea discontinua gris se definen las bandas de frecuencias de interés, bajas, intermedias y altas; con línea discontinua azul se indican las frecuencias de las componentes dominantes del fenómeno de marea terrestre teórica y su respectiva nomenclatura.

Con respecto a la banda de frecuencias intermedias ($0.5 < f < 10$ cpd), resalta el valor bajo de coherencia entre el nivel del agua y presión barométrica, inferior a 0.1, particularmente en componentes diurnas; no así en las semi-diurnas, mayor a 0.8; se obtuvieron valores de coherencia bajos para las frecuencias diurnas y semi-diurnas, menores a 0.2, entre el nivel del agua y la marea terrestre, lo que indicaría que las variaciones semi-diurnas de presión barométrica para este pozo, son el fenómeno dominante y podría ser explicado si consideramos: combinación de un nivel freático somero y condiciones climáticas extremas, esto último induce fluctuaciones de presión barométrica durante las horas de sol debido al calentamiento de la atmósfera, ambas condiciones propiciarían una mínima sensibilidad de los materiales en las inmediaciones del pozo al efecto de la marea terrestre. Sin embargo, la función de coherencia en el resto de los pozos analizados presentó un comportamiento distinto, observándose valores de coherencia entre la presión barométrica y el nivel del agua para componentes diurnas en el rango de 0.2 a 0.8, y semi-diurnas de 0.5 a 0.9; mientras que la coherencia entre nivel del agua y marea terrestre fue de 0.2 a 0.7 y 0.2 a 0.8, respectivamente, lo anterior podría indicar que las propiedades de los materiales que conforman el acuífero en inmediaciones del pozo C-03, son distintas a las propiedades en otros pozos considerados en este estudio.

En la banda de frecuencias altas ($f > 10$ cpd), la coherencia entre el nivel del agua y la presión barométrica mostró un valor promedio de 0.5, incluso mayor al de las frecuencias diurnas, lo que indica que el nivel del agua es muy sensible a las fluctuaciones de alta frecuencia de la presión atmosférica, asociada a la cercanía del nivel freático con la superficie del terreno, el alto valor de coherencia también podría ser explicado por la presencia de características geológicas y geohidrológicas que propician el efecto de almacenamiento en el pozo. Este comportamiento se observó en el resto de los pozos, indicando que la combinación de materiales geológicos y condiciones geohidrológicas, nivel freático somero, propician el efecto de almacenamiento en pozo. Por otro lado, la coherencia entre nivel del agua y marea terrestre, presenta un valor promedio cercano a 0.4, aun cuando las componentes de alta frecuencia en el fenómeno de marea terrestre se consideran nulas o despreciables, este comportamiento se apreció para esta de banda de frecuencias en el resto de los pozos analizados.

La estimación continúa de eficiencia barométrica y sensibilidad a la marea terrestre, en las bandas de frecuencias bajas, intermedias y altas, mediante el cálculo de funciones de transferencia considerando el efecto de presión barométrica y marea terrestre de forma acoplada y desacoplada, en la sección previa al evento sísmico en el pozo C-03, se muestra en la Figura 5.

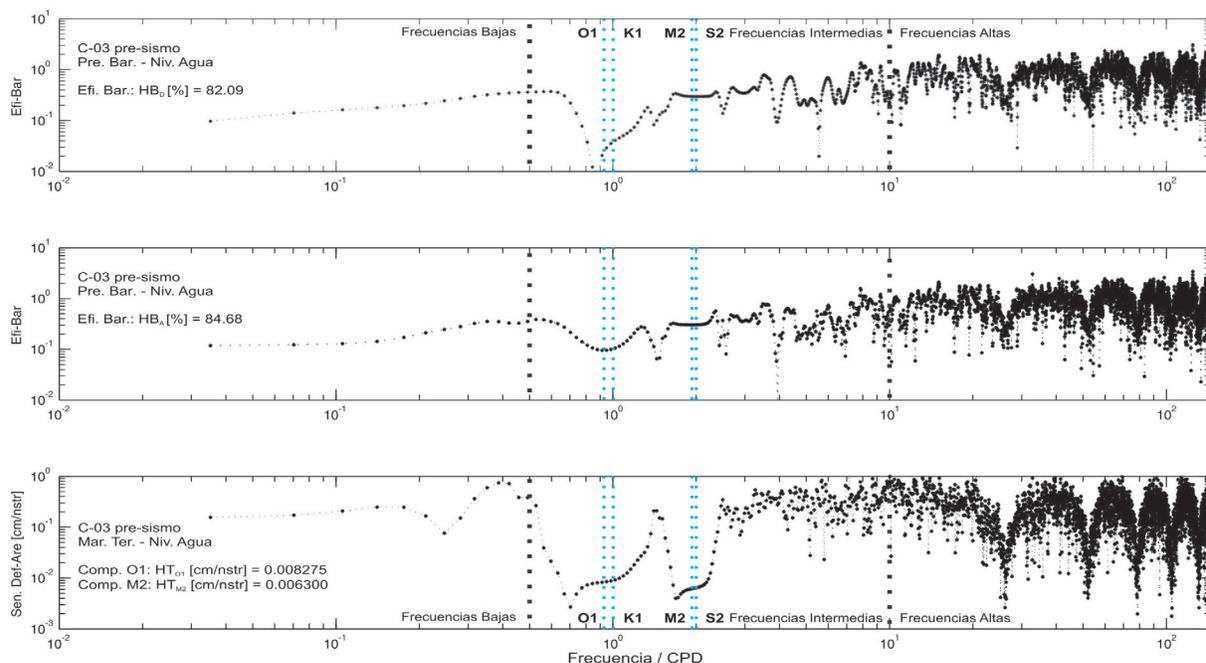


Figura 5 | Módulo de la función de transferencia entre los registros considerados para el pozo con clave C-03 en la sección previa al evento sísmico; con línea discontinua gris se definen las bandas de frecuencias de interés, bajas, intermedias y altas; con línea discontinua azul se indican las frecuencias de las componentes dominantes del fenómeno de marea terrestre teórica y su respectiva nomenclatura.

En la banda de frecuencias bajas ($f < 0.5$ cpd), se observó un valor bajo y estable de eficiencia barométrica del orden de 20%, para la consideración acoplada y desacoplada. En la banda de frecuencias intermedias ($0.5 < f < 10$ cpd), para la estimación desacoplada de eficiencia barométrica se obtuvo un comportamiento inestable conforme aumenta la frecuencia, particularmente a frecuencias diurnas, las componentes semi-diurnas presentan mayor estabilidad y un valor mayor de eficiencia barométrica, ~40%. Considerando la estimación acoplada, presentó un comportamiento estable, debido principalmente a la acción conjunta de ambos fenómenos, presión barométrica y marea terrestre. En la banda de frecuencias altas ($f > 10$ cpd), se obtuvo un valor de eficiencia barométrica alto, ~80%, en ambos modos acoplado y desacoplado.

De manera general en el resto de los pozos se observó un comportamiento similar, en las bajas frecuencias valores estables de eficiencia barométrica inferiores a 30%; en la banda de frecuencias intermedias, se presentó variabilidad en las componentes diurnas y semi-diurnas, con tendencia a estabilizarse conforme aumenta el valor de la coherencia, y con valores de eficiencia barométrica en el rango de 30 y 50%; finalmente en la banda de frecuencias altas, se apreció incremento en el valor de la eficiencia barométrica entre 70 a 100%, debido a la respuesta inmediata a las fluctuaciones rápidas de presión barométrica actuando sobre un espesor mínimo de zona vadosa entre la superficie del terreno y el nivel freático del acuífero.

Considerando estimaciones globales de las funciones de transferencia en modo desacoplado y acoplado, se obtuvieron valores similares de eficiencia barométrica, para el pozo C-03, $HB_D = 82.09\%$ y $HB_A = 84.68\%$, respectivamente; la diferencia entre ambos valores, se relaciona con la afectación directa debida a considerar a la marea terrestre actuando simultáneamente, en el modo acoplado. En la Tabla 2 se enlistan los valores de eficiencia barométrica obtenidos para cada una de los modos acoplado y desacoplado, en cada uno de los pozos en estado pre-sismo y post-sismo. Observándose disminución en el valor de eficiencia barométrica, post-sismo, posiblemente relacionado con un reacondo de los materiales que conforman el acuífero.

Tabla 2 | Valores de eficiencia barométrica reportada en [porcentaje] y de sensibilidad a la marea terrestre en [mm/nstrn] para los modelos acoplado y desacoplado; y mediante ajuste de armónicos para cada uno de los pozos considerados, en condiciones pre-sismo y post-sismo.

| Número y Clave Pozo | Eficiencia Barométrica (%) | | Sensibilidad a Marea Terrestre (mm/nstr · 10 ⁻²) | | Sensibilidad a Marea Terrestre (mm/nstr · 10 ⁻²) | |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|------------------|---|-------------|
| | Acoplada [HB _A] | Desacoplada [HB _D] | HT _{O1} | HT _{M2} | O1 | M2 |
| | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post |
| 1.- C - 03 | 84.67/79.81 | 82.09/80.54 | 8.27/11.90 | 6.30/7.91 | 14.78/23.25 | 14.44/16.89 |
| 2.- PZ - 03 | 69.11/66.68 | 67.65/69.46 | 2.12/8.27 | 4.18/6.30 | 7.88/9.10 | 19.49/15.94 |
| 3.- PZ - 05 | 76.03/68.32 | 76.98/69.49 | 2.91/8.27 | 9.06/10.40 | 2.59/16.64 | 21.11/21.97 |
| 4.- PZ - 07 | 77.90/69.20 | 75.23/69.38 | 2.02/7.22 | 7.55/5.49 | 5.61/14.50 | 16.92/12.40 |
| 5.- G - 117 | 76.99/77.22 | 73.85/75.23 | 1.34/4.38 | 5.25/3.18 | 4.40/10.62 | 12.16/9.35 |

La estimación global de las funciones de transferencia, considerando todo el espectro de frecuencias disponible es acorde a lo propuesto por Lai *et al.* (2013) y difiere de considerar solamente frecuencias inferiores a 2 cpd, como se propone en (Rojstaczer, 1988a; Rojstaczer y Riley, 1990; Quilty y Roeloffs, 1991). Además, los valores de eficiencia barométrica obtenidos son congruentes con los esperados para un acuífero en condiciones libres, con algunas condiciones de confinamiento locales; eficiencia barométrica, acuífero confinado: 20-75%; acuífero libre: 80-100% (Solinst, 2011).

La función de transferencia de la respuesta del nivel del agua a la acción de la marea terrestre, mostró una fuerte influencia del fenómeno de presión barométrica, propiciando la aparición de valores de sensibilidad a marea terrestre en la banda de frecuencias bajas y altas, aún cuando las componentes de la marea terrestre son mínimas y comúnmente despreciadas. No así en la banda de frecuencias intermedias, donde su influencia es mayor, sin embargo, debido a que se observó un valor bajo de coherencia entre el nivel del agua y la marea terrestre, se esperaba obtener una estimación baja de sensibilidad a marea terrestre, lo que se confirmó. Para contrarrestar lo anterior, se realizó un análisis de armónicos según lo descrito en la metodología; en la Figura 6 se muestra el ajuste de los datos observados del nivel del agua, reducidos-filtrados, y el modelo teórico de los armónicos principales de la marea terrestre para el pozo C-03 en un estado pre-sismo; considerando además el campo de esfuerzos horizontales inducido por la marea terrestre teórica; con lo anterior fue posible calcular la amplitud exacta de las componentes de la respuesta del nivel del agua a la

acción de marea terrestre; y además la amplitud de las componentes del campo de esfuerzo originado por la marea terrestre teórica; combinando estos resultados se obtuvieron estimaciones de sensibilidad a marea terrestre para cada uno de los pozos y que se enlistan en la Tabla 2.

Los valores de sensibilidad a marea terrestre obtenidos fueron mayores con respecto a los calculados con las funciones de transferencia, posiblemente debido al tratamiento independiente de los fenómenos que producen las variaciones del nivel del agua. Se obtuvieron valores de sensibilidad menores para la componente O1 y mayores para M2; que es consistente con lo reportado por (Rojstaczer y Agnew, 1989; Rojstaczer y Riley, 1990); además explican que fenómenos de gran escala y baja frecuencia, como flujo subterráneo regional o efectos atmosféricos, pueden causar atenuación en la componente diurna de la marea terrestre. Con base en lo anterior, la estimación de algunos de los parámetros geohidrológicos y geofísicos de los materiales, sólo consideró el valor de la sensibilidad a marea terrestre de la componente M2 y la eficiencia barométrica acoplada, para la condición pre-sismo y post-sismo, en cada uno de los pozos considerados en este estudio.

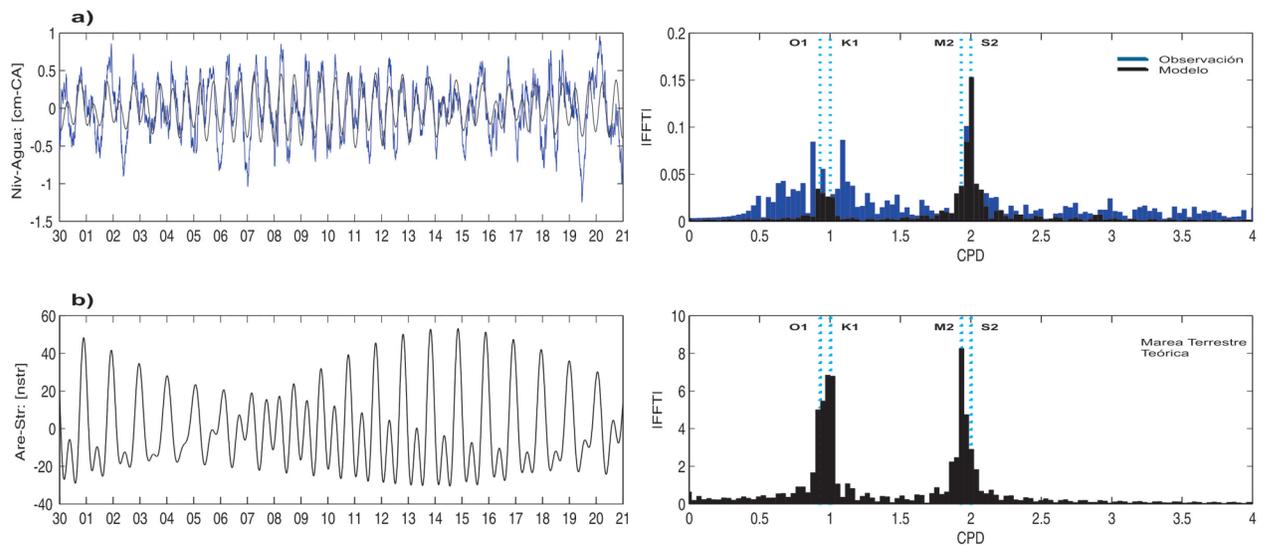


Figura 6 | a) Ajuste entre observaciones reducidas y su correspondiente modelo de armónicos de la marea terrestre ajustado por errores mínimos cuadrados, y su respectivo espectro discreto de frecuencias, para el pozo con clave C-03 en condición pre-sismo. b) Campo de esfuerzos horizontales teórico análisis y su correspondiente espectro discreto de frecuencias, etiquetando los constituyentes dominantes.

Determinación de algunas propiedades del acuífero

El comportamiento de las funciones de transferencia, en la banda de frecuencias altas indica la presencia del efecto de almacenamiento en pozo, esto no cumple una de las condiciones de la respuesta confinada-estática teórica, efecto de almacenamiento en pozo despreciable, sin embargo, los valores de eficiencia barométrica corresponden al límite entre valores esperados para acuífero confinado y libre, además en estudios previos se ha reportado respuesta semi-confinada en algunas zonas dentro del área de estudio, se sugiere que una aproximación a las condiciones de confinamiento-estático teórico es válida, sin embargo, las estimaciones de los valores de las propiedades geohidrológicas y geofísicas, deben ser consideradas como valores posibles y no exactos, y usarse sólo como referencia cuando no exista información de pruebas físicas en campo.

La determinación de algunas de las propiedades de los materiales que conforman el acuífero de acuerdo a lo descrito en el apartado de metodología, requiere del conocimiento previo de valores de compresibilidad de la matriz porosa bajo condiciones no drenadas, β_u , se consideraron los resultados reportados por Schatz (1982), donde mediante pruebas mecánicas de compresión isotrópica y uni-axial a núcleos producto de la perforación de algunos pozos de exploración y producción del reservorio geotérmico Cerro Prieto, en areniscas de finas a gruesas obtuvo una compresibilidad, β_u , de $1.2 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, y $1.0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, respectivamente. Se consideró el valor inicial, β_u , de $1.0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, consistente con, β_u , $1.0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, para una formación geológica típica (Rojstaczer

y Agnew, 1989); se sustituyeron valores de eficiencia barométrica y sensibilidad a marea terrestre calculados en estado pre-sismo y post-sismo; siguiendo las Ecuaciones (13 a 16) se calcularon valores de compresibilidad de la matriz, coeficiente Skempton, porosidad, almacenamiento específico y aproximación al coeficiente de almacenamiento.

Los valores de las propiedades geohidrológicas y geofísicas de los materiales que conforman el acuífero fueron estimadas usando: $\beta_f = 4.40 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$; ρ variable expresada en kg/m^3 en el rango (995.71 a 997.86) dependiendo del valor promedio de la temperatura del agua dentro del pozo analizado; $g = 9.79 \text{ m/s}^2$ calculado para la localización geográfica del Valle de Mexicali; y un módulo de Poisson $\nu = 0.25$ siendo el límite inferior de las areniscas en condiciones saturadas reportado por Somerton (1980); la estimación de la aproximación al coeficiente de almacenamiento, es decir, el producto del almacenamiento específico y el espesor saturado, $b = 200 \text{ m}$, no considera el valor del rendimiento específico. La Tabla 3 enlista los valores de las estimaciones de algunos de los parámetros geohidrológicos y geofísicos para cada uno de los pozos.

Tabla 3 | Algunas propiedades geohidrológicas y poroelásticas de los materiales que conforman el acuífero en las inmediaciones de cada uno de los pozos considerados en estado pre – y post – sismo, bajo una aproximación a condiciones de confinamiento – estático teórico.

| Número Pozo | Compresibilidad de la Matriz | Porosidad del Acuífero | Almacenamiento Específico | Aprox. Coeficiente Almacenamiento | Coeficiente Skempton |
|----------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| | (10^{-10} Pa^{-1}) | (%) | (10^{-6} m^{-1}) | (10^{-4} --) | (--) |
| | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post | Pre/Post |
| 1.- C - 03 | 1.36/1.59 | 44.01/30.24 | 1.77/1.48 | 3.54/2.96 | 0.18/0.24 |
| 2.- PZ - 03 | 2.37/3.35 | 23.61/26.77 | 1.88/2.47 | 3.75/4.94 | 0.36/0.38 |
| 3.- PZ - 05 | 1.52/2.13 | 25.49/19.86 | 1.27/1.50 | 2.55/3.01 | 0.28/0.36 |
| 4.- PZ - 07 | 1.77/3.96 | 34.56/35.59 | 1.76/3.12 | 3.52/6.23 | 0.26/0.35 |
| 5.- G - 117 | 2.72/3.58 | 47.27/53.39 | 2.78/3.49 | 5.56/6.97 | 0.27/0.26 |

Los valores obtenidos de compresibilidad son consistentes con los reportados por Rojstaczer y Agnew (1989), para un conjunto de pozos en la zona de Parkfield, CA, β , de 1.1 a $2.7 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, siendo ese estudio el más cercano geográficamente al área de estudio; sin embargo, en ese mismo trabajo señalan que para estimaciones de $\beta > 3.0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, la eficiencia barométrica y la sensibilidad a marea terrestre pueden tener valores bajos, lo que probablemente dificulte la estimación de algunos de los parámetros de la formación, situación observada en los pozos PZ-03, PZ-07 y G-117 de nuestro estudio, en condiciones post-sismo. Con la anterior consideración, y observando la Ecuación (15) se define una relación proporcional directa, entre el valor de porosidad calculado con base en la compresibilidad estimada; lo que explicaría el valor alto de porosidad obtenido en los pozos PZ-07 y G-117. Aunado a lo anterior, de la revisión de la Ecuación (13) se identifica un relación proporcional inversa, entre el valor de compresibilidad calculado con base en la estimación de la sensibilidad a marea terrestre, lo que da soporte a sólo considerar a la componente M2 para el cálculo de las propiedades del acuífero; sin embargo, diferencias significativas entre el campo de esfuerzos horizontales real y el teórico utilizado, sería la principal fuente de error en las estimaciones realizadas.

Los resultados obtenidos del cálculo del coeficiente Skempton, son inconsistentes con lo reportado para los materiales similares a los presentes en el acuífero de estudio, sedimentos no-consolidados, $B \geq 0.50$; para nuestro estudio, el promedio fue de $B \sim 0.30$, esto tiene relación con el grado de consolidación de los materiales, además de la presencia de intercalaciones de distintos materiales, que propician la disminución del valor de este coeficiente.

Valores calculados de almacenamiento específico en las inmediaciones de los pozos, son congruentes con lo reportados para formaciones compuestas por el tipo de sedimentos presentes en la zona de estudio, arenas sueltas, $S_s = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, Domenico y Schwartz (1997). La aproximación al coeficiente de almacenamiento se plantea realizando sólo el producto de almacenamiento específico por espesor saturado, debido a que este producto es menor al rendimiento específico en acuíferos libres, por lo que el coeficiente de almacenamiento frecuentemente se reporta como rendimiento específico. Combinando algunos de los valores obtenidos y mostrados en las Tablas 2 y 3, se identifican algunas relaciones y que se muestran en Figura 7.

De la integración de resultados se definen algunas relaciones entre los valores de las propiedades del acuífero estimadas; se aprecia una disminución general del valor de eficiencia barométrica después del evento sísmico en todos los pozos considerados;

los valores de eficiencia barométrica tienen una relación proporcional inversa con las estimaciones del coeficiente de Skempton; incrementos o decrementos en los valores de la sensibilidad a marea terrestre presentan relación proporcional inversa con las estimaciones de porosidad. De manera general se observó un incremento en la compresibilidad del medio de un estado previo a posterior al sismo, mismo comportamiento se aprecia con el coeficiente Skempton.

El pozo PZ-07 presentó la mayor variabilidad en los resultados de los parámetros calculados, excepto en la porosidad, este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de un nivel freático más somero. Mientras que el pozo relativamente más estable fue el pozo G-117, sin embargo, debido a su valor de compresibilidad, limita la exactitud de las estimaciones. No se encontró alguna relación en la que influya la mayor profundidad de los pozos (C-03 y G-117).

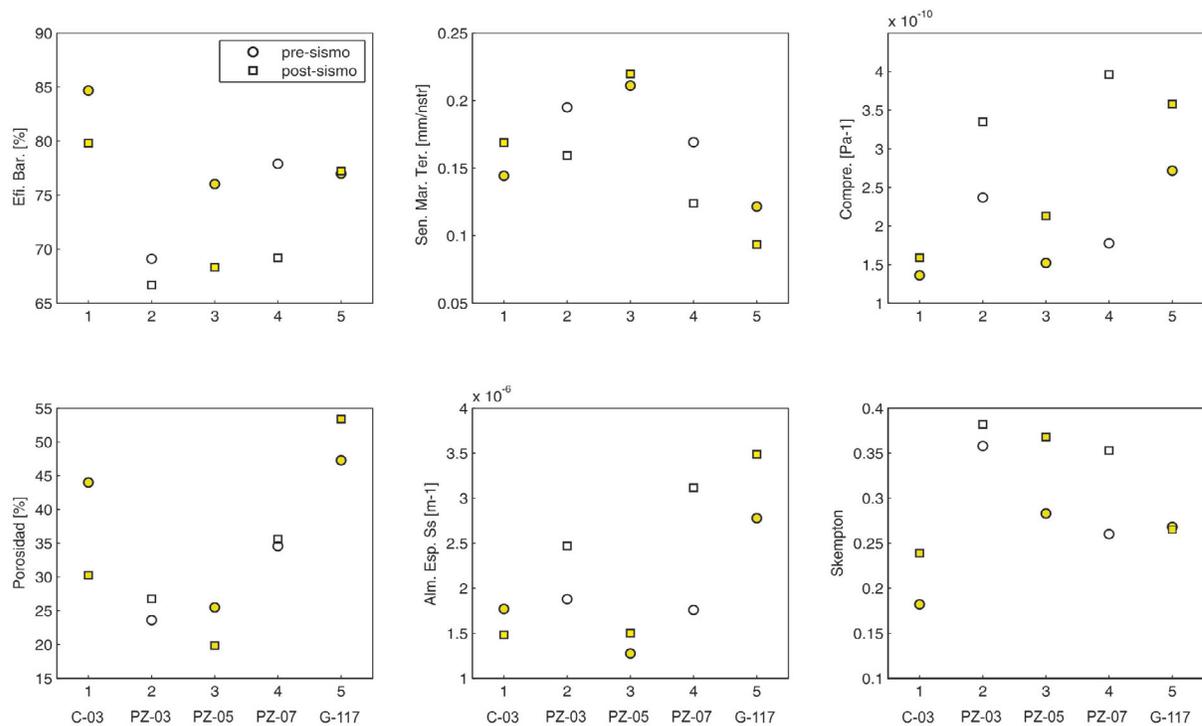


Figura 7 | Integración de resultados en un sentido comparativo a los valores obtenidos de eficiencia barométrica, sensibilidad a la marea terrestre, compresibilidad de la matriz, porosidad, almacenamiento específico, y coeficiente Skempton, en condiciones previas y posteriores al sismo ocurrido. Círculos rellenos y vacíos indican incremento o descenso co-sísmico en el nivel del agua, respectivamente.

CONCLUSIONES

El análisis de las series de tiempo correspondientes a las variaciones de nivel del agua en pozos de monitoreo, en respuesta a la influencia de fluctuaciones de presión barométrica y a la acción de la marea terrestre permitió la estimación de algunos parámetros geohidrológicos y poroelásticos, en cinco pozos de monitoreo en la zona del Valle de Mexicali.

Utilizando técnicas de análisis en los dominios del tiempo y la frecuencia, principalmente mediante el cálculo de funciones de transferencia y análisis de armónicos para la respuesta del nivel del agua a los fenómenos de presión atmosférica y marea gravitacional teórica, se obtuvieron resultados en un estado previo y posterior del medio a un sismo en la zona de interés.

Se realizó un análisis comparativo de los cambios en la magnitud de los parámetros del sistema acuífero, posteriores a un sismo de magnitud moderada. Se calcularon inicialmente estimaciones de eficiencia barométrica, sensibilidad a marea terrestre, compresibilidad de la matriz, porosidad, almacenamiento específico, coeficiente de almacenamiento y coeficiente de Skempton, mostrando valores acordes a los obtenidos en estudios previos en formaciones similares. Se calcularon estos mismos parámetros,

pero en un estado posterior al sismo, identificando variación en los valores calculados; sin embargo, no fue posible establecer todas las relaciones proporcionales directas entre los cambios observados; una posible explicación de esto es la evidente diferencia entre las propiedades físicas visibles en cada uno de los sitios donde se ubican los pozos de monitoreo; y por otro lado, el hecho de que se supone que la respuesta del acuífero cumple las condiciones de confinamiento—estático teórico, aunque una de las condiciones no fue cumplida completamente, efecto de almacenamiento en pozo, sin embargo, los resultados obtenidos, representan estimaciones razonables de las propiedades de los materiales en la zona de estudio, sin embargo, estos valores deben de ser considerados sólo como referencia y considerando las suposiciones descritas.

La marea terrestre teórica y la marea terrestre observada, presentan diferencias asociadas a las características locales del área de estudio, esto es un factor que incrementan la incertidumbre en la estimación de algunos de los parámetros en los que intervenga la sensibilidad del medio a la acción de la marea terrestre, sin embargo, debido a que comúnmente no se realizan observaciones de marea terrestre en un sitio de interés, la utilización de la marea terrestre teórica, mostró ser una herramienta importante para cubrir esta carencia de información, además los modelos actuales empleados para su cálculo, producen series de tiempo con valores muy precisos, y tienen la ventaja de poder calcular series de tiempo en el pasado o si es necesario predecir el comportamiento de la marea terrestre teórica, lo que la convierte en una herramienta versátil.

El análisis presentado en este estudio puede ser considerado como un marco de referencia para el análisis de registros de variaciones del nivel del agua dentro de pozos de monitoreo, con el objetivo de calcular algunas de las propiedades de los materiales en la zona de interés, como representó el Valle de Mexicali, y en donde no se habían realizado estudios de este tipo; además la metodología mostrada, puede ser replicada en cualquier otra ubicación geográfica, condiciones geológicas y geohidrológicas distintas, con la intención de lograr un mejor entendimiento de las características geohidrológicas que controlan el flujo de agua en el subsuelo, y así lograr plantear protocolos idóneos para una gestión sustentable del recurso hídrico subterráneo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen sinceramente los comentarios y sugerencias realizadas por cada uno de los revisores. Este trabajo ha sido financiado por recursos otorgados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, México, a través de la beca para estudios de posgrado No. 234622, Mario Alberto Fuentes Arreazola.

REFERENCIAS

- Agnew, D. C. (2012). *SPOTL: Some programs for ocean-tides loading*. Technical Report, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, USA.
- Álvarez-Rosales, J. (1999). Aspectos generales sobre geohidrología en Cerro Prieto, B. C., México. *Geotermia*, 15(1), 05-10.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G. (1986). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley, New York USA.
- Berger, J., Beaumont, C. (1976). An analysis of tidal strain observations from the United States of America II. The inhomogeneous tide. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(6), 1821-1846.
- Berger, J., Farrell, W., Harrison, J. C., Levine, J., Agnew, D. C. (1987). *ERTID 1. A program for calculation of solid Earth tides*. Publication of the Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, USA.
- Bredehoeft, J. D. (1967). Response of well-aquifer systems to Earth tides. *Journal of Geophysical Research*, 72(12), 3075-3087, doi:10.1029/JZ072i012p03075
- Domenico, P. A., Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology (2nd edition)*, John Wiley, USA.
- Igarashi, G., Wakita, H. (1991). Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells. *Journal of Geophysical Research*, 96(B3), 4269-4278, doi:10.1029/90JB02637

- Jacob, C. E. (1940). On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Transactions American Geophysical Union*, 21(2), 574-586, doi:10.1029/TR021i002p00574
- Lai, G., Hongkui, G., Weilai, W. (2013). Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band. *Journal of Geophysical Research*, 118(5), 1904-1924, doi:10.1002/jgrb.50165
- Nur, A., Byerlee, J. D. (1971). An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids. *Journal of Geophysical Research*, 76(26), 6414-6419, doi:10.1029/JB076i026p06414
- Quilty, E. G., Roeloffs, E. A. (1991). Removal of barometric pressure response from water level data. *Journal of Geophysical Research*, 96(B6), 10209-10218, doi:10.1029/91JB00429
- Rahi, K., Halihan, T. (2009). *Estimating selected hydraulic parameters of the Arbuckle-Simpson aquifer*. Final report submitted to the Oklahoma Water Resources Board, Oklahoma State University School of Geology, 53 p.
- Rice, J. R., Cleary, M. P. (1976). Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. *Reviews of Geophysics*, 14(2), 227-241, doi:10.1029/RG014i002p00227
- Roeloffs, E. A. (1988). Hydrological precursors to earthquakes: A review. *Pure and Applied Geophysics*, 126(2), 177-209, doi:10.1007/BF00878996
- Rojstaczer, S. (1988a). Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading. *Water Resources Research*, 24(11), 1927-1938, doi:10.1029/WR024i011p01927
- Rojstaczer, S. (1988b). Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level. *Journal of Geophysical Research*, 93(B11), 13619-13634, doi:10.1029/JB093iB11p13619
- Rojstaczer, S., Agnew, D. C. (1989). The influence of formation materials properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading. *Journal of Geophysical Research*, 94(B9), 12403-12411, doi:10.1029/JB094iB09p12403
- Rojstaczer, S., Riley, F. S. (1990). Response of the water level in a well to Earth tides and atmospheric loading under unconfined conditions. *Water Resources Research*, 26(8), 1803-1817, doi:10.1029/WR026i008p01803
- Schatz, J. F. (1982). *Physical processes of subsidence in geothermal reservoirs*. Report No. TR82-39, Terratek, Salt Lake City, Utah, and Lawrence Berkeley Laboratory, Report LBL-14605, 136p.
- Solinst. (2011). *Levellogger series, user guide*. Solinst LTD, Canada. 72p.
- Somerton, W. H. (1980). Some physical properties of Cerro Prieto cores. *Geothermics*, 9(1-2), 159-168, doi:10.1016/0375-6505(80)90029-2
- Van Der Kamp, G., Gale, J. E. (1983). Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. *Water Resources Research*, 19(2), 538-544, doi:10.1029/WR019i002p00538
- Vázquez-González, R. (1999). Condiciones geohidrológicas del acuífero somero en la zona del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Geotermia*, 15(1), 11-18.