

RESEARCH ARTICLE

Mechanical interaction between the Río de La Plata and the coastal aquifer system in the Northeast of the Province of Buenos Aires, Argentina

Interacción mecánica entre el Río de La Plata y el sistema de acuíferos costeros en el Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Julián Eduardo Cuello^{1,2}, Luis Guarracino^{1,2}, Mar Alcaraz^{2,3}, Luis Vives³, Jesús Carrera⁴

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. Paseo del Bosque s/n, La Plata 1900, Provincia de Bs. As., Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Rivadavia, 1917. C1066AAJ Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff". República de Italia, 78. B7300 Azul, Provincia de Bs. As., Argentina.

⁴ GHS UPC-CSIS Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIS). Jordi Girona 18, 08034 Barcelona, España.

Corresponding author: julianecuello@gmail.com (Julián Eduardo Cuello)

ABSTRACT

Key points

We apply tidal-induced method to analyze the mechanical interaction between Río de La Plata and Puelche and Paraná coastal aquifers

Paraná aquifer presents an increase in hydraulic diffusivity with distance from the coast, while Puelche aquifer is more homogeneous

Hydraulic conductivity value of Puelche aquifer fit values obtained through pumping tests, Paraná's value is new to regional knowledge

In this work the tidal-induced method is applied with the goal of analyzing the mechanical interaction between the Río de La Plata and the Puelche and Paraná coastal aquifers in Buenos Aires Province, Argentina. From this analysis, the hydraulic diffusivities and conductivities of the aforementioned aquifers were estimated. Applying a non-invasive technique that uses a natural signal instead of traditional pumping tests is key due the high levels of pollution of the surface waters in the study region. The amplitude and the phase-shift of the main components observed in the signals are used to estimate the hydraulic diffusivity by using van der Kamp (1972) solution for confined aquifers. Using different tidal components allows to obtain additional information about the heterogeneities of the aquifer. The results suggest that the Paraná aquifer presents an increase in the hydraulic diffusivity with the distance from the coast, while the Puelche aquifer is more homogeneous. Hydraulic conductivity values can be calculated from the elastic parameters of the formations. To obtain average conductivity values, a weighted average of the estimates obtained for each frequency was carried out. The hydraulic conductivity value corresponding to the Puelche aquifer is within the range of values obtained through pumping tests, while the estimate corresponding to the Paraná aquifer constitutes a contribution to the hydrogeological knowledge of the region since this aquifer has been little studied.

Keywords: Aquifer; Hydrodynamics; Borehole; Induced tide; Mechanical interaction.

Article History:

Received: 19/03/2021

Accepted: 15/09/2021

RESUMEN

Puntos clave

Se aplica el método de marea inducida para analizar interacción mecánica entre los acuíferos costeros Puelche y Paraná con Río de La Plata

La difusividad hidráulica del acuífero Paraná aumenta con la distancia a la costa; el acuífero Puelche presenta una mayor homogeneidad

La conductividad hidráulica del Puelche encaja con cifras obtenidas en ensayo de bombeo; el valor para Paraná es nuevo conocimiento regional

En este trabajo se presenta una aplicación del método de marea inducida con el fin de analizar la interacción mecánica entre los acuíferos costeros Puelche y Paraná y el Río de La Plata en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. A partir de este análisis se estimaron las difusividades y conductividades hidráulicas de los acuíferos mencionados. La utilización de una metodología no invasiva que utiliza una señal natural en lugar de los tradicionales ensayos de bombeo es recomendable para la región debido a la contaminación de aguas superficiales. La fase y la amplitud de las componentes principales observadas en las señales son utilizadas para calcular la difusividad hidráulica empleando la solución de van der Kamp (1972) para acuíferos confinados. La utilización de componentes de marea de distinta frecuencia permite obtener información adicional acerca de las heterogeneidades de los acuíferos. Los resultados sugieren que el acuífero Paraná presenta un aumento de la difusividad hidráulica con la distancia a la costa, mientras que el acuífero Puelche presenta una mayor homogeneidad. A partir de los parámetros elásticos de las formaciones pueden calcularse los valores de conductividad hidráulica. Para obtener valores promedio de conductividad se realiza un promedio ponderado de las estimaciones obtenidas para cada frecuencia. El valor de conductividad hidráulica correspondiente al Puelche se encuentra dentro del rango de valores obtenidos mediante ensayos de bombeo, mientras que la estimación correspondiente al acuífero Paraná constituye un aporte al conocimiento hidrogeológico de la región ya que este acuífero ha sido poco estudiado.

Palabras clave: Acuífero; Hidrodinámica; Pozo; Marea inducida; Interacción mecánica.

Historial del artículo:

Recibido: 19/03/2021

Aceptado: 15/09/2021

1. Introducción

Los acuíferos costeros presentan particularidades que los diferencia del resto de los acuíferos por estar en contacto con un cuerpo de agua superficial como el mar o el estuario de un río. Problemáticas tales como la intrusión salina o la posible contaminación debido a la sobreexplotación son de común ocurrencia en este tipo de acuíferos. La interacción entre las aguas superficiales y subterráneas puede ser de tipo hidráulica o mecánica. La más común de ellas es la conexión hidráulica que tiene lugar cuando existe un contacto directo entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial. Las variaciones del nivel del río u océano debidas al efecto gravitatorio lunisolar (mareas) se propagan hidráulicamente tierra adentro y pueden ser medidas en pozos cercanos a la costa. La atenuación y el desfase de la señal en el pozo dependerán de las propiedades hidráulicas del acuífero. En aquellos casos en que el acuífero se encuentra confinado y se prolonga por debajo del cuerpo de agua superficial puede existir una conexión mecánica. En este caso, las variaciones del nivel del río u océano generan un efecto de carga sobre el material subyacente que se deforma elásticamente generando una onda de presión. Esta onda induce una señal hidráulica que se propaga tierra adentro en el acuífero confinado que también puede

ser detectada en pozos cercanos a la costa. La medición de las variaciones de los niveles piezométricos inducidas por el fenómeno de marea constituye la base del método de marea inducida. Esta técnica permite obtener el valor de difusividad hidráulica del acuífero tanto para el caso de conexión hidráulica como mecánica. Para poder estimar la conductividad hidráulica debe contarse con una estimación del almacenamiento que puede calcularse a partir de las propiedades elásticas del medio.

En el noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, el sistema de acuíferos costeros interactúa con el Río de La Plata y con un emblemático afluente del mismo, el Río Matanza Riachuelo, llamado coloquialmente Riachuelo. Este afluente es el principal cuerpo de agua superficial de una cuenca que abarca parte de la ciudad de Buenos Aires y 14 municipios de la Provincia de Buenos Aires. Dentro de los márgenes de esta cuenca vive aproximadamente el 15% de la población argentina. Históricamente, el Riachuelo ha recibido numerosos desechos industriales, especialmente metales pesados. Según el último informe elaborado por las organizaciones ambientalistas Cross International y el Instituto Blacksmith, la cuenca Matanza Riachuelo se encuentra entre los diez lugares más contaminados del planeta (Blacksmith, 2013). En escenarios como

el descrito es de vital importancia la utilización de técnicas que no perturben el flujo de agua subterránea para el estudio de los acuíferos y sus propiedades hidráulicas.

La técnica más empleada para el estudio y la determinación de los parámetros hidráulicos de acuíferos es el ensayo de bombeo (Yeh and Huang, 2009; Trabucchi *et al.*, 2018). Esta técnica implica la extracción de grandes volúmenes de agua y la medición de los descensos en pozos de monitoreo cercanos. A partir de estos descensos pueden estimarse la transmisividad y el almacenamiento de acuíferos confinados o la conductividad hidráulica y el rendimiento específico de acuíferos libres (Barlow and Moench, 1999). La principal desventaja es que requiere la extracción de un importante caudal de agua durante períodos extensos, resultando desaconsejable su aplicación en regiones donde existe contaminación o peligro de intrusión salina (Jha *et al.*, 2003; Chattopadhyay *et al.*, 2015). En estos casos, la utilización de una señal natural que no implique el bombeo de agua para el estudio de los parámetros hidráulicos constituye una importante ventaja. El método de marea inducida se basa precisamente en el análisis de las señales naturales generadas en los cuerpos de agua superficial por la atracción gravitatoria lunisolar y de las fluctuaciones que se inducen en los acuíferos costeros. Por otro lado, resulta importante destacar que la caracterización realizada mediante un ensayo de bombeo es de tipo local, mientras que la asociada al método de marea inducida abarca una mayor porción de acuífero dándole un carácter más regional. El fenómeno de marea inducida en acuíferos costeros comenzó a estudiarse a mediados del siglo XX. Jacob (1950) fue el primer investigador en derivar una solución analítica para describir el fenómeno de marea inducida considerando un acuífero confinado, homogéneo e infinito conectado hidráulicamente al cuerpo de agua superficial. Esta solución es de simple aplicación y ha sido profusamente utilizada para la estimación de los parámetros hidráulicos en acuíferos costeros. Ferris (1951) estimó la difusividad hidráulica de un acuífero en contacto con el río Platte en Estados Unidos utilizando la solución de Jacob. Carr y van der Kamp (1969) estimaron la conductividad hidráulica de un acuífero costero en la Isla del Príncipe Eduardo, Canadá, y compararon sus resultados con los obtenidos mediante ensayos de bombeo. Drogue *et al.* (1984) utilizó solu-

ciones analíticas para analizar la marea inducida en un acuífero kárstico costero. Erskine (1991) analizó la atenuación y el desfase de la marea inducida en las proximidades de una estación de energía nuclear en cercanías al Mar del Norte en Reino Unido. Millham y Howes (1995) compararon distintos métodos para determinar la conductividad hidráulica en un acuífero costero no confinado. Rotzoll *et al.* (2013) estimaron los parámetros hidráulicos en NGLA (Northern Guam Lens Aquifer) a partir de la atenuación y el desfase de la marea inducida. Zhou *et al.* (2015) estimaron los parámetros hidráulicos de un acuífero costero en Beiahi, al sur de Guangxi, China. Posteriormente a la solución de Jacob se han presentado soluciones analíticas que consideran mayores complejidades del modelo. Guo *et al.* (2010) derivaron una solución analítica para un acuífero conformado por dos zonas contiguas y homogéneas y ajustaron una serie de datos correspondientes a un acuífero heterogéneo en Dongzhai Harbour, China. Monachesi y Guarracino (2011) y Guarracino y Monachesi (2014) derivaron soluciones analíticas válidas para acuíferos aluviales cuyas conductividades hidráulicas aumentan linealmente y cuadráticamente con la distancia a la costa. También se han derivado soluciones analíticas que contemplan variaciones en el espesor de los acuíferos costeros, lo que permite obtener indicadores de un posible acuífero (Cuello *et al.*, 2017; Cuello y Guarracino, 2020). Los trabajos mencionados hasta el momento consideran que el acuífero y el cuerpo de agua superficial están en contacto hidráulico.

Van der Kamp (1972) sentó las bases del estudio de marea inducida de origen mecánico estudiando la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea, considerando un acuífero confinado que se extiende infinitamente por debajo del mar. Guarracino *et al.* (2012) analizaron el efecto mecánico de la marea inducida en un sistema acuífero que se extiende una distancia finita por debajo del cuerpo de agua superficial. Dadas las características de la zona, la solución presentada por van der Kamp (1972) resulta útil para el estudio de los parámetros hidráulicos de los acuíferos costeros Puelche y Paraná y para analizar posibles heterogeneidades. Estos acuíferos se extienden por debajo del río alcanzando su costa oriental en Uruguay, razón por la cual los efectos de borde pueden despreciarse y considerarse de extensión infinita.

Para estimar la difusividad hidráulica de los acuíferos costeros (ya sea hidráulicamente o mecánicamente conectados al cuerpo de agua superficial) puede utilizarse tanto la atenuación de la señal como su desfase con respecto a la marea del cuerpo de agua superficial. La atenuación se define como el cociente entre la amplitud de la señal en el acuífero y la amplitud de la señal en el cuerpo de agua superficial. El desfase se obtiene restando las fases de ambas señales. En condiciones ideales, donde el modelo estuviera representado a la perfección y no existieran errores en la adquisición de datos, estas dos estimaciones serían iguales. Esto no suele ocurrir (Drogue *et al.*, 1984; Erskine, 1991; Trefry and Johnston, 1999), por lo que se define un factor de heterogeneidad para cuantificar la diferencia que existe entre ambas estimaciones. A partir de la estimación de la difusividad hidráulica y de las propiedades elásticas del medio es posible obtener el valor de la conductividad hidráulica, que es el parámetro comúnmente utilizado para caracterizar el flujo de agua.

En este contexto general, el objetivo de este trabajo es analizar la interacción mecánica entre el Río de La Plata y el sistema de acuíferos costeros del noreste de la Provincia de Buenos Aires utilizando el método de marea inducida. A partir de la aplicación de este método se analizarán las diferencias entre las estimaciones de difusividad y conductividad hidráulica mediante amplitud y fase, así como el efecto de las componentes de marea de distinta frecuencia en la estimación de parámetros hidráulicos.

2. Región de estudio

La zona de estudio se encuentra en el Partido de Avellaneda, al noreste de la Cuenca Matanza Riachuelo, en la Planicie Costera del Río de La Plata. En líneas generales, la geología de la región de estudio comprende las formaciones que se describen a continuación (Auge, 2005). Los sedimentos Postpampeanos constituyen la formación más superficial y están formados por arcillas, limos arcillosos y arenosos con cordones de conchillas de origen marino, fluvial y lacustre. Su espesor varía de escasos centímetros en la Llanura Alta hasta los 25 metros en la ribera del Río de La Plata. En cuanto a su comportamiento hidrogeológico, responde principalmente como un acuitardo. En la región de estudio los sedimentos Postpampeanos constituyen el manto freático. Los sedimentos Pampeanos se empla-

zan por debajo del Postpampeano. Están conformados por un limo arenoso de origen eólico y fluvial. Su espesor disminuye al acercarse al río, llegando a ser casi nulo. Su base está formada por un limo arcilloso de unos 6 metros de espesor medio otorgándole al acuífero Puelche un comportamiento de acuífero semiconfinado. Las arenas Puelches constituyen una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas algo arcillosas de origen fluvial. Poseen estratificación gradada y representan el acuífero más importante de la región por su calidad y productividad. El acuífero Puelche ocupa en forma continua aproximadamente 92.000 km² en el subsuelo del noreste de la Provincia de Buenos Aires. También ocupa parte del noreste de la Provincia de La Pampa, del sur de las Provincias de Entre Ríos y Santa Fe y del este de la Provincia de Córdoba. Se encuentra a profundidades de entre 20 y 50 m con espesores que varían entre 20 y 30 m. Utilizando ensayos de bombeo se han obtenido en la región noreste de la Provincia de Buenos Aires valores de conductividad hidráulica para el Puelche de entre 9 y 57 m/d y un valor medio de 30 m/d (Auge, 2001). Por debajo del acuífero Puelche se encuentra la formación Paraná, que está constituida por arcillas y arenas de origen marino. La sección inferior de la formación constituye el acuífero Paraná, que está separada del acuífero Puelche por una formación arcillosa poco permeable comprendida en la sección superior de la formación Paraná (Auge *et al.*, 2002). El acuífero Paraná ha sido poco estudiado y presenta escasos estudios hidrogeológicos realizados principalmente por organismos privados.

En la zona de estudio, los acuíferos semiconfinados Puelche y Paraná se extienden por debajo del Río de La Plata (Rinaldi *et al.*, 2006; Parker, 1990). La conexión existente entre el río y los acuíferos mencionados es de origen mecánico. El acuífero Puelche ha sido muy estudiado en distintos sectores y es intensamente explotado debido a la calidad de sus aguas (Auge *et al.*, 2002). El acuífero Paraná que se encuentra a mayor profundidad ha sido poco estudiado y explotado, siendo los valores de sus parámetros hidráulicos virtualmente inexistentes en la literatura. Los sedimentos Postpampeanos, que constituyen el manto freático en la región costera del Río de La Plata, están conectados hidráulicamente al río. Sin embargo, la señal de marea inducida que se observa en los sedimentos Postpampeanos se extingue rápidamente.

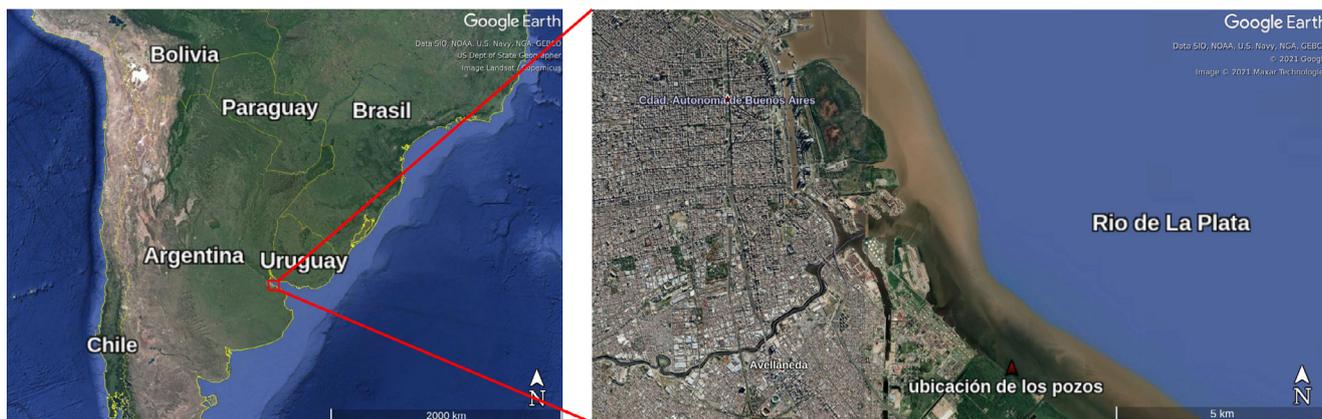


Figura 1. Imagen satelital (extraída de Google Earth) con la ubicación de los pozos de monitoreo utilizados en este trabajo.
Figure 1. Satellite image (extracted from Google Earth) showing the location of the monitoring wells.

En el marco del Proyecto de Investigación “Aguas subterráneas en la cuenca Matanza Riachuelo” llevado a cabo por la Autoridad de la cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), cuyo objetivo es estudiar el comportamiento hidráulico de la Cuenca Matanza Riachuelo y los acuíferos de la región, se realizaron perforaciones en distintas locaciones. En este trabajo se utilizarán pozos ubicados en cercanías del extremo noreste de la cuenca a escasos metros de la costa del estuario del Río de La Plata, que fueron construidos específicamente para analizar la interacción de los acuíferos con el estuario (Figura 1).

En el panel derecho de la figura se observa la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y el Riachuelo que constituye su límite sur, mientras que en el panel izquierdo muestra el contexto nacional/internacional. La localización cuenta con 4 pozos. El pozo 8A, que perfora las arenas de la formación Paraná, el pozo 8B que registra las variaciones piezométricas del acuífero Puelche y los pozos 8C y 8D que perforan los sedimentos Postpampeanos (Figura 2). Como se mostrará más adelante, los pozos 8A y 8B presentan señales de marea inducida fácilmente identificables. Por otra parte, la marea inducida medida en los pozos 8C y 8D se atenúa rápidamente.

El pozo que perfora el acuífero Puelche se encuentra a 55 metros de la costa del estuario del Río de La Plata y el pozo que perfora el acuífero Paraná se encuentra a 52 metros de la costa. Los pozos 8C y 8D se encuentran a 58 y a 21 metros de la costa, respectivamente.

3. Metodología

Para el análisis de la marea inducida de origen mecánico y la determinación de sus parámetros hidráulicos se utilizará la ecuación de van der Kamp (1972) válida para acuíferos confinados que se extienden infinitamente por debajo de un cuerpo de agua superficial. Considerando una marea cosenoidal de una única frecuencia de la forma $m(t) = A \cos(\omega t)$, van der Kamp (1972) obtuvo la siguiente solución para la marea inducida en el acuífero:

$$h(x,t) = \frac{L_e}{2} A e^{-ax} \cos(\omega t - ax) \quad (1)$$

donde h es la altura piezométrica (m), x la distancia a la costa (m), t el tiempo (días), A la amplitud de la marea (m), ω su frecuencia angular (d^{-1}) y L_e (adimensional) el parámetro de eficiencia de carga. El parámetro de propagación de marea se define como:

$$a = \sqrt{\frac{\omega S_s}{2K_s}} = \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \quad (2)$$

donde S_s es el almacenamiento específico, K_s es la conductividad hidráulica y $D = \frac{K_s}{S_s}$ la difusividad hidráulica. Si se compara la ecuación (1) con la señal de marea $m(t)$ se puede distinguir un decaimiento exponencial de la amplitud de $h(x,t)$ con la distancia a la costa x de la forma $c(x) = \frac{L_e}{2} e^{-ax}$ y un desfase $\Delta\phi(x) = -ax$. Otro parámetro importante para analizar es la longitud característica, que se desprende del coeficiente

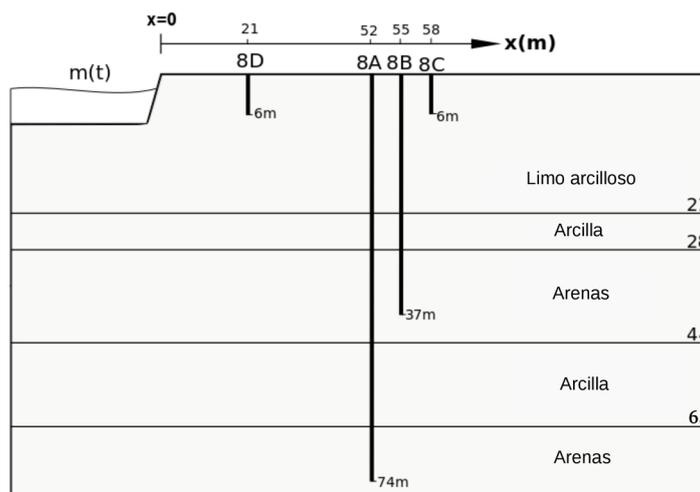


Figura 2. Perfil esquemático de las perforaciones en las arenas Puelche y Paraná con sus respectivas profundidades y distancias a la costa del estuario del Río de La Plata. En la zona también se encuentran pozos excavados en los sedimentos Postpampeanos.

Figure 2. Schematic profile of the perforations in the Puelche and Paraná sands with their respective depths and distances to the coast of the Río de La Plata estuary. In the area there are also wells dug in the Postpampean sediments.

de propagación de marea y se define como $L_c = a^{-1}$. Este parámetro mide la región de acuífero afectada por la marea ya que para $x = L_c$ la amplitud de la marea inducida se reduce a $Ae^{-1} \frac{L_e}{2}$, lo que representa aproximadamente $\frac{1}{6}$ de la amplitud de la señal en el río. Notar que, cuanto mayor es la frecuencia de la componente de marea, menor es la longitud característica.

Para estimar los parámetros hidráulicos de los acuíferos mediante el método de marea inducida es necesaria la adquisición de las señales piezométricas y del registro mareográfico del río. Como se mencionó anteriormente, para obtener la difusividad hidráulica D pueden utilizarse tanto la caída de amplitud de la señal inducida, $c(x)$, como su desfase respecto a la señal de marea, $\Delta\phi(x)$. La expresión para la determinación de difusividad hidráulica mediante caída de amplitud $D_{amp}(m^2/d)$ se puede obtener a partir de la expresión de $c(x)$ y de la Ec. (2):

$$D_{amp}(x) = \frac{\omega x^2}{2 \ln^2 \frac{2c(x)}{L_e}} \quad (3)$$

Como puede observarse, la difusividad mediante amplitud está en función de la distancia a la costa, de la frecuencia de la componente, de la caída de amplitud de la marea inducida y del factor de eficiencia de carga. La eficiencia de carga

es un parámetro muy cercano a la unidad y puede obtenerse a partir de las propiedades elásticas de la formación (van der Kamp and Gale, 1983):

$$L_e = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{n}{k_f}} \quad (4)$$

donde k es la compresibilidad de la formación, k_f es la compresibilidad del agua que la satura y n la porosidad. Utilizando una porosidad del 20% para las arenas de ambos acuíferos (Auge et al., 2002) y los módulos elásticos determinados por Lo et al. (2007) se obtuvo un coeficiente de eficiencia de carga L_e de 0.99735 para el acuífero Paraná y de 0.99687 para el acuífero Puelche. Para obtener la expresión de difusividad hidráulica mediante fase $D_{fa}(m^2/d)$ se utiliza la expresión de $\Delta\phi(x)$ y la Ec. (2):

$$D_{fa}(x) = \frac{\omega x^2}{2 \phi^2(x)} \quad (5)$$

En este caso, la estimación de difusividad hidráulica está en función del desfase entre ambas señales, así como también de la distancia a la costa y la frecuencia de la componente. Es importante remarcar que estas expresiones para estimar la difusividad hidráulica de los acuíferos son válidas para una única frecuencia, de manera tal que cada componente de marea tendrá

asociada una estimación de difusividad mediante atenuación de amplitud y desfase. Las amplitudes y las fases de las señales necesarias para las estimaciones de difusividad se obtienen a partir de la transformada de Fourier. Las fases están medidas en radianes y toman valores de entre $-\pi$ y π . En cuanto a la aplicabilidad del cálculo de desfase, debe considerarse que en la práctica la resta de fases puede presentar un corrimiento de fase de 2π que habrá que considerar en cada caso particular.

Las diferencias de valores entre ambas estimaciones de difusividad son un indicador del grado de heterogeneidad existente en el acuífero. Trefry y Bekele (2004) definieron el factor de heterogeneidad, que cuantifica las diferencias entre ambas estimaciones, de la siguiente manera:

$$FH = \sqrt{\frac{D_{amp}}{D_{fa}}} \quad (6)$$

Si el acuífero es homogéneo y no existen errores en la adquisición de datos el factor de heterogeneidad será igual a 1 independientemente de la frecuencia utilizada. Un apartamiento respecto a la unidad del FH es común en análisis con datos reales debido a las heterogeneidades que suelen presentar los acuíferos y debido a errores inherentes a la adquisición de datos. Por ejemplo, Trefry y Bekele (2004) obtuvieron valores del factor de heterogeneidad en el rango entre 0.3 y 3.8 basados en el análisis de distintos grupos de datos.

En este trabajo se utilizan 12 componentes características de marea que han sido identificadas tanto en la señal mareográfica como en las señales piezométricas inducidas. Consecuentemente, cada acuífero contará con 12 estimaciones de D_{amp} , 12 estimaciones de D_{fa} y 12 factores de heterogeneidad, lo que permitirá realizar un análisis más detallado de los acuíferos. En la mayoría de los trabajos que utilizan la técnica de marea inducida sólo se considera la componente semidiurna de marea M2 por ser la de mayor amplitud y de más fácil identificación.

Para calcular valores de conductividad hidráulica a partir de la difusividad es necesario estimar el almacenamiento específico que depende de las propiedades elásticas del medio (van der Kamp and Gale, 1983):

$$S_s = \rho g \frac{1}{k} + \frac{n}{k_f} \quad (7)$$

donde ρ es la densidad del agua, g la gravedad y k , k_f y n los parámetros elásticos definidos anteriormente. El valor de S_s obtenido para las arenas de la formación Paraná fue de $3.26 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ y el valor obtenido para el acuífero Puelche fue de $2.76 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.

4. Adquisición y procesamiento de datos

Los registros piezométricos fueron medidos entre el 11 de marzo y el 23 de junio del año 2015 con un intervalo de muestreo de 10 minutos. La adquisición de datos se realizó utilizando sensores marca Schlumberger denominados mini-divers. Estos sensores, que se ubican dentro de los pozos, miden la variación de presión y, mediante un factor de conversión, la presión se convierte en centímetros de agua. Son capaces de almacenar 24000 registros y tienen una precisión de 0.5 cm/10 m. Utilizando un sensor superficial se corrige en los registros el aporte de la variación de presión atmosférica. El registro mareográfico, que tiene un intervalo de muestreo horario, fue provisto por el Servicio de Hidrografía Naval del Ministerio de Defensa de la Nación Argentina. La señal mareográfica junto con las señales piezométricas correspondientes a los acuíferos Puelche y Paraná utilizadas en este trabajo se ilustran en la Figura 3.

Como puede observarse, la señal de marea originada en el estuario del Río de La Plata se propaga tierra adentro y es detectada en los acuíferos Puelche y Paraná. Teniendo en cuenta las profundidades de los pozos, la marea inducida de origen mecánico resulta significativa. Las señales presentan similitudes evidentes y tienen una fuerte componente semidiurna, ya que pueden identificarse dos picos diarios. A partir de un análisis espectral mediante la transformada de Fourier pueden identificarse las principales componentes de las señales (Figura 4).

En los 3 espectros se evidencian las fuertes componentes semidiurnas que caracterizan los registros. Del análisis de las señales temporales, así como de las amplitudes de las principales componentes puede concluirse que el Río de La Plata y los acuíferos Puelche y Paraná están mecánicamente conectados. Como se mencionó anteriormente, la marea inducida medida en los sedimentos Postpampeanos está fuertemente atenuada. Esto queda evidenciado en la Figura 5, que muestra la señal hidráulica y el espectro de amplitud del pozo 8D, el más cercano a la costa.

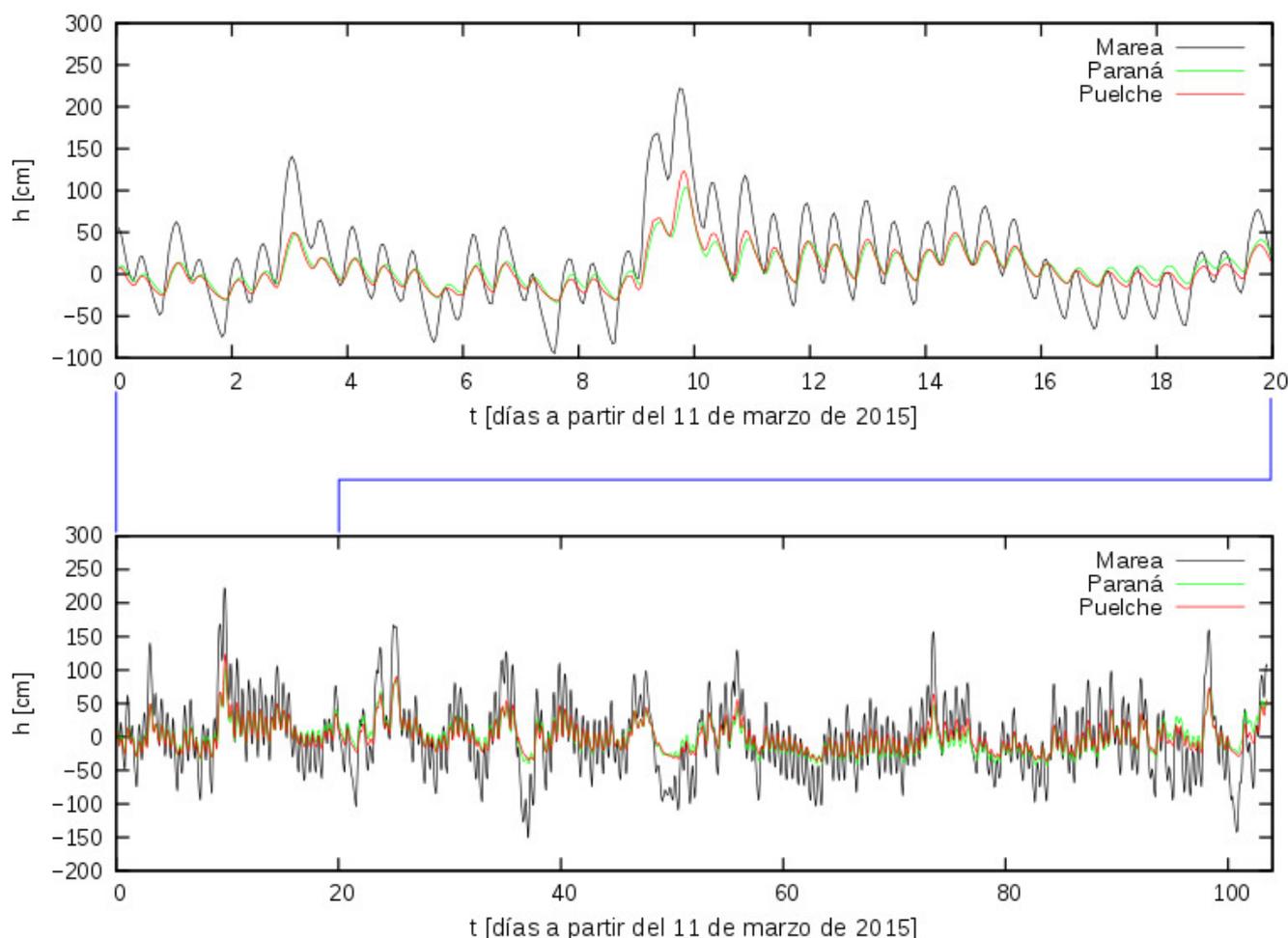


Figura 3. Señales piezométricas correspondientes a los acuíferos Puelche y Paraná y señal mareográfica correspondiente al estuario del Río de La Plata.

Figure 3. Piezometric signals corresponding to the Puelche and Paraná aquifers and tidal signals corresponding to the Río de La Plata estuary.

Si bien en los sedimentos Postpampeanos se registran los picos de la crecida del río, son muy pequeñas las amplitudes de las componentes de marea que se observan significativamente en el espectro correspondiente al estuario del Río de La Plata en la Figura 4. La marea inducida en los sedimentos Postpampeanos se atenúa fuertemente debido a su alto valor de almacenamiento (Jiao and Tang, 1999; Li and Jiao, 2001).

La medición de la marea inducida de origen mecánico en los acuíferos Puelche y Paraná nos permite estimar parámetros hidráulicos, a diferencia de lo que ocurre con los sedimentos Postpampeanos, donde la marea inducida de origen hidráulico se atenúa fuertemente.

Teniendo en cuenta trabajos previos donde se estudian las componentes más importantes de la marea en el Río de La Plata (D'Onofrio *et al.*, 2012), se han identificado en los espectros de Fourier 12 componentes características tanto en

el registro mareográfico como en las señales piezométricas: M2, MKS2, K2, NU2, N2, S2, Theta 1, Phi 1, S1, MP1, O1 y M4. La componente M4 es la de mayor frecuencia, asociada a un período de 6,21 horas. Las componentes M2, MKS2, K2, NU2, N2 y S2 son de carácter semidiurno con períodos en torno a las 12 horas. Las componentes Theta 1, Phi 1, S1, MP1 y O1 son de naturaleza diurna y las de menor frecuencia. En la Tabla 1 se listan las componentes observadas en la señal mareográfica junto con su período correspondiente, su amplitud y su fase.

En las Tablas 2 y 3 se listan las amplitudes, fases y longitudes características de las componentes correspondientes a las señales piezométricas de los acuíferos Puelche y Paraná. Las longitudes características se calculan a partir de a , obteniendo de esta forma dos valores de L_c por componente, una a partir de la caída de amplitud $c(x)$ y otra a partir del desfase $\Delta\phi(x)$.

Espectros de amplitud

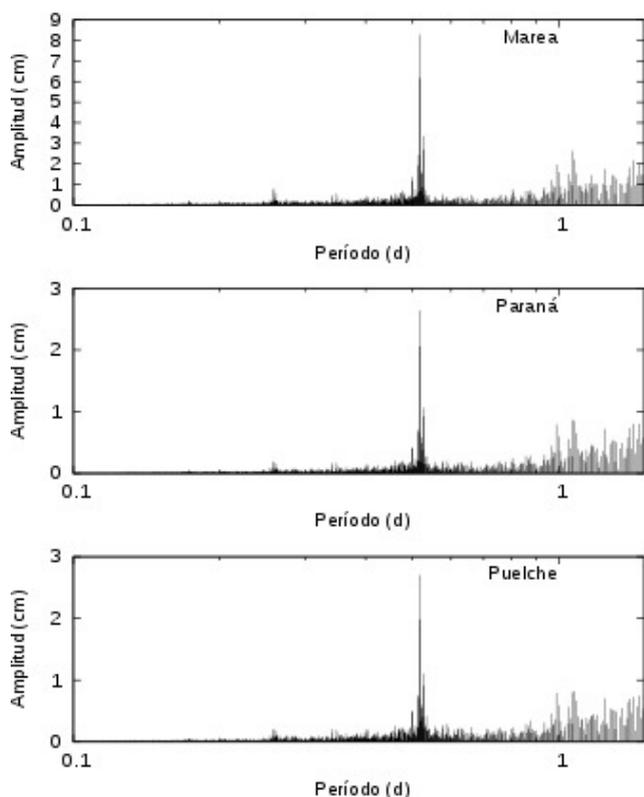


Figura 4. Espectros de amplitud en función del período del registro mareográfico y de las señales piezométricas correspondientes a los acuíferos Paraná y Puelche.

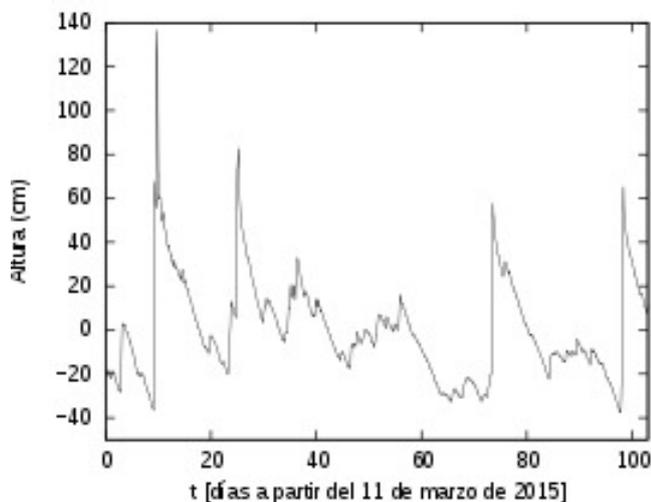
Figure 4. Amplitude spectra as a function of the period of tidal recording and piezometric signals corresponding to the Paraná and Puelche aquifers.

5. Resultados

A partir de las amplitudes y fases de las señales en los pozos y en el río, considerando la frecuencia correspondiente a cada componente y la distancia a la costa de cada pozo, se obtienen las estimaciones de difusividad hidráulica mediante amplitud (Ec. 3) y fase (Ec. 4). En las Tablas 4 y 5 se presentan las estimaciones de difusividad hidráulica D_{fa} y D_{amp} correspondiente a los acuíferos Paraná y Puelche respectivamente para cada componente de marea. En las Tablas también se incluyen los factores de heterogeneidad FH .

Las estimaciones de difusividad hidráulica a partir de la fase D_{fa} correspondientes al acuífero Paraná son del orden de 10^5 m²/d mientras que las estimaciones a partir de la amplitud D_{amp} varían entre los órdenes de 10^5 m²/d y 10^6 m²/d. Los valores de FH van desde 0.85 a 1.67 y son en su mayoría superiores a 1. Factores de heterogeneidad sistemáticamente mayores a 1 podrían indicar una disminución del espesor del acuífero tierra adentro (Cuello *et al.*, 2017, Cuello y Guaracino, 2020). En la Figura 6 se muestran las estimaciones de difusividad hidráulica mediante fase y amplitud en función del período de cada componente. En la gráfica se incluye una tendencia lineal para cada grupo de estimaciones mediante amplitud y fase. El objetivo de la tendencia lineal obtenida mediante mínimos cuadra-

Señal temporal



Espectro de amplitud

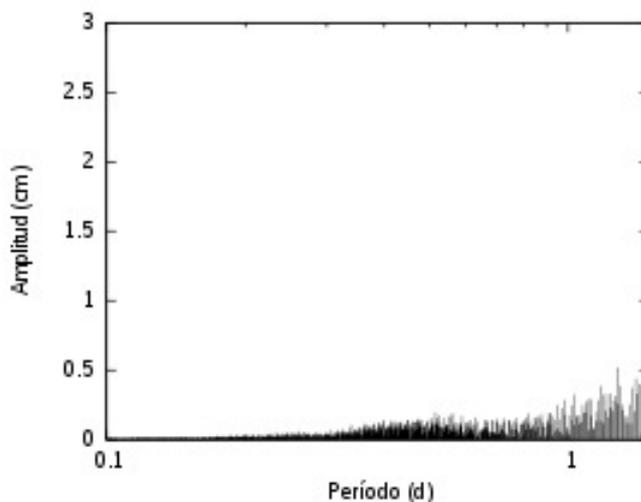


Figura 5. Señal hidráulica y espectro de amplitud correspondiente al pozo de monitoreo 8D. Este pozo perfora los sedimentos Postpampeanos y es el que más cerca a la costa se encuentra.

Figure 5. Hydraulic signal and amplitude spectrum corresponding to monitoring well 8D. This well reaches the Postpampean sediments and is the one that is closest to the coast.

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Fase (rad)
M4	6.21	0.008	2.96
M2	12.42	0.0617	-1.7
MKS2	12.39	0.0828	0.14
K2	11.97	0.0137	0.11
S2	12	0.0116	-2.08
NU2	12.63	0.0336	-1.97
N2	12.66	0.027	2.73
Theta 1	23.21	0.0121	0.74
Phi 1	23.8	0.0196	0.52
S1	24	0.016	0.04
MP1	25.67	0.0263	2.43
O1	25.82	0.0221	0.29

Tabla 1. Amplitud y fase de las componentes observadas en el registro mareográfico.

Table 1. Amplitude and phase of the components observed in the tidal record.

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Fase (rad)	L_c AMP (m)	L_c FA (m)
M4	6.21	0.0019	-2.24	48	70
M2	12.42	0.0206	-1.04	77	130
MKS2	12.39	0.0264	0.75	85	116
K2	11.97	0.0042	0.56	116	107
S2	12	0.0041	-1.55	98	151
NU2	12.63	0.0107	-1.4	91	116
N2	12.66	0.0093	-2.94	85	141
Theta 1	23.21	0.0045	1.15	127	177
Phi 1	23.8	0.0079	0.86	153	244
S1	24	0.006	0.48	118	182
MP1	25.67	0.0087	2.78	149	127
O1	25.82	0.0085	0.68	133	200

Tabla 2. Amplitud y fase de las componentes observadas en la señal piezométrica correspondiente al acuífero Paraná.

Table 2. Amplitude and phase of the components observed in the piezometric signal corresponding to the Paraná aquifer.

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Fase (rad)	L_c AMP (m)	L_c FA (m)
M4	6.21	0.0021	-2.6	76	86
M2	12.42	0.02	-1.4	177	128
MKS2	12.39	0.027	0.4	212	130
K2	11.97	0.0049	0.34	239	166
S2	12	0.005	-1.74	162	379
NU2	12.63	0.011	-1.78	289	131
N2	12.66	0.0091	3.04	177	141
Theta 1	23.21	0.0046	0.84	500	203
Phi 1	23.8	0.008	0.62	550	275
S1	24	0.006	0.38	162	193
MP1	25.67	0.008	2.62	289	111
O1	25.82	0.0082	0.45	343	186

Tabla 3. Amplitud y fase de las componentes observadas en la señal piezométrica correspondiente al acuífero Puelche.

Table 3. Amplitude and phase of the components observed in the piezometric signal corresponding to the Puelche aquifer.

Componente	Período (h)	D_{amp} (m ² /d)	D_{fa} (m ² /d)	FH
M4	6.21	59656.3	28143.3	1.46
M2	12.42	101903.8	36366.3	1.67
MKS2	12.39	82231.7	44209.9	1.36
K2	11.97	72065.9	84236.8	0.93
S2	12	143454.8	60150.7	1.54
NU2	12.63	80291.2	49430.8	1.27
N2	12.66	117726.7	43319.8	1.65
Theta 1	23.21	102100.2	52261.9	1.4
Phi 1	23.8	189471.1	74272.3	1.6
S1	24	104456.2	43835.6	1.54
MP1	25.67	47124.6	64809.2	0.85
O1	25.82	116965.7	51872	1.5

Tabla 4. Estimaciones de difusividad hidráulica D_{amp} y D_{fa} correspondiente al acuífero Paraná. También se incluyen los valores de FH.

Table 4. D_{amp} y D_{fa} hydraulic diffusivity estimates corresponding to the Paraná aquifer. FH values are also included.

Componente	Período (h)	D_{amp} (m ² /d)	D_{fa} (m ² /d)	FH
M4	6.21	89315	70839.6	1.12
M2	12.42	99117.1	188997	0.72
MKS2	12.39	102219.5	272239.6	0.61
K2	11.97	173255.9	360736.6	0.69
S2	12	900899.1	164497.5	2.34
NU2	12.63	102251.7	500474.9	0.45
N2	12.66	117784.7	187646.8	0.79
Theta 1	23.21	133955.2	982813.8	0.37
Phi 1	23.8	240595	960513.2	0.5
S1	24	117258.1	82128.3	1.19
MP1	25.67	36417.5	246027.8	0.38
O1	25.82	101312.3	344778.8	0.54

Tabla 5. Estimaciones de difusividad hidráulica D_{amp} y D_{fa} correspondiente al acuífero Puelche. También se incluyen los valores de FH.

Table 5. D_{amp} y D_{fa} hydraulic diffusivity estimates corresponding to the Puelche aquifer. FH values are also included.

dos es evidenciar las variaciones de las estimaciones de la difusividad con el período y con la longitud característica L_c .

Como puede observarse en los valores de difusividades, así como también en las tendencias lineales, cuanto mayor es el período y mayor es la L_c (menores frecuencias), se obtienen mayores valores de difusividad, tanto para las estimaciones realizadas con información de caída de amplitud como las realizadas mediante desfase. La existencia de diferencias en las estimaciones de difusividad hidráulica en función de la frecuencia es un indicador de heterogeneidad del acuífero. La longitud característica, que nos permite determinar la distancia de penetración de cada componente de marea, es clave para determinar qué porción de acuífero se ve afectada por cada componente. Como se observa en la Tabla 2, la L_c más pequeña corresponde a la componente M4, que es la de mayor frecuencia. A medida que aumenta el período de las componentes, las L_c aumentan. De esta forma puede asociarse la estimación de difusividad hidráulica de la componente M4 con una porción de acuífero cercana a la costa y, a medida que aumenta la L_c , las estimaciones de difusividad hidráulica son

representativas de porciones de acuífero cada vez mayores.

Las tendencias lineales evidencian el aumento de la difusividad hidráulica con la longitud característica. Esto nos permite concluir que resulta altamente probable que en el acuífero Paraná la difusividad hidráulica aumente con la distancia a la línea de costa.

En cuanto al acuífero Puelche, las estimaciones de difusividad hidráulica son mayormente del orden de 10^6 m²/d, aunque algunas son del orden de 10^5 m²/d. Los FH que se obtienen presentan valores mucho más alejados de la unidad. El rango de valores va de 0.37 a 2.34. Para el análisis posterior sólo se considerarán las componentes de señales cuyo factor de heterogeneidad sea mayor a 0.5 y menor a 2, ya que los valores muy alejados de la unidad se asocian a errores en la medición o de otra índole no atribuible a una eventual heterogeneidad. Las componentes que no cumplan esta condición quedarán excluidas del análisis. Para el Puelche se considerarán entonces las componentes M4, M2, MKS2, S1, O1, K2 y N2. Los factores de heterogeneidad considerados resultan en su mayoría menores a 1. Esto podría indicar la

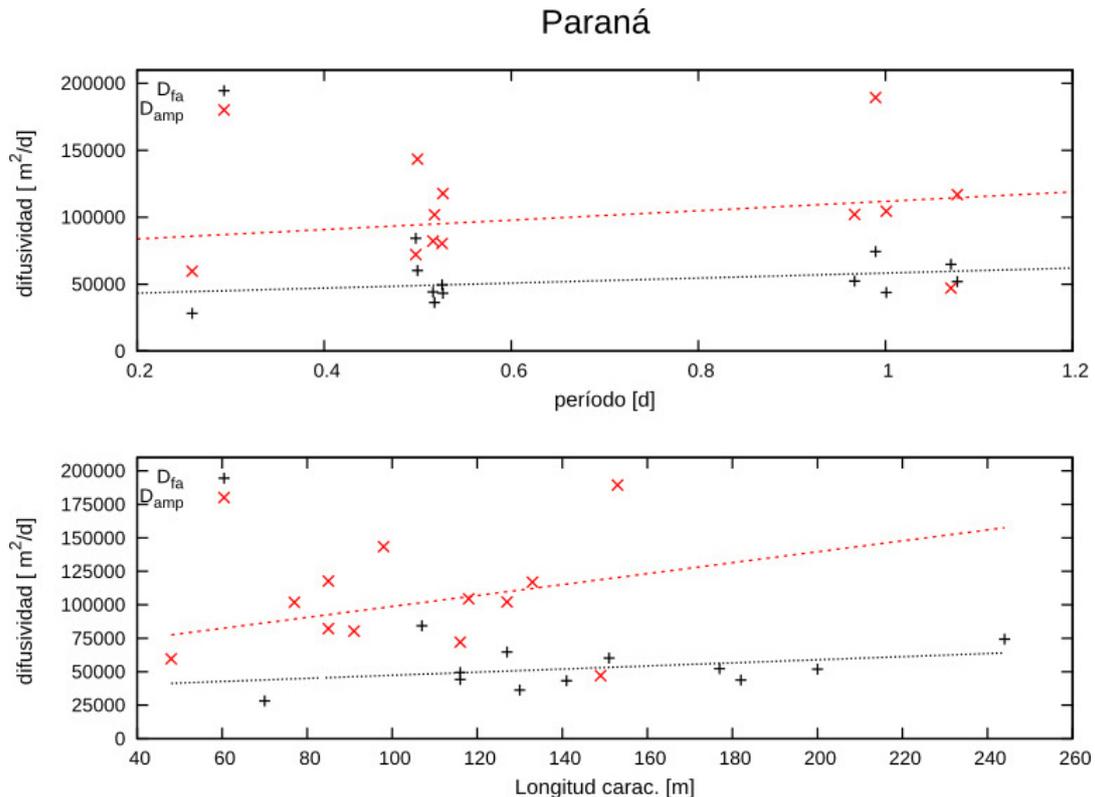


Figura 6. D_{fa} y D_{amp} correspondientes al acuífero Paraná en función del período de las componentes y de la longitud característica. En el gráfico se incluyen tendencias lineales para los valores de D_{fa} y para los valores de D_{amp} .

Figure 6. D_{fa} y D_{amp} corresponding to Paraná aquifer as a function of both the period and the characteristic length. Linear trends for D_{fa} and D_{amp} are included.

existencia de un aumento del espesor del acuífero tierra adentro. En la Figura 7 se muestran las distintas estimaciones de difusividad hidráulica en función del período de la componente y de la longitud característica, junto con las tendencias lineales para cada grupo (atenuación y desfasaje).

Para el caso de D_{fa} , la tendencia lineal es creciente en ambos gráficos al igual que en el acuífero Paraná, mientras que para D_{amp} las pendientes son muy cercanas a 1. Las estimaciones de difusividad hidráulica mediante amplitud no se ven afectadas por la distancia de penetración de cada componente. De este análisis podemos concluir que el acuífero Puelche presenta mayor homogeneidad que el Paraná.

En las Tablas 6 y 7 se presentan las estimaciones de conductividad hidráulica para los acuíferos Paraná y Puelche obtenidas a partir de las estimaciones de difusividad y de los valores de almacenamiento específico mencionados en la metodología.

Con el objetivo de obtener una estimación de conductividad hidráulica representativa de cada

acuífero utilizando todas las componentes de marea observadas cuyo factor de heterogeneidad fuera mayor a 0.5 y menor a 2, se realiza un promedio ponderado utilizando el FH como peso. La expresión utilizada es la siguiente:

$$\underline{K} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (K_{amp_i} + K_{fa_i}) \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (8)$$

donde N es la cantidad de componentes utilizadas, siendo los pesos $P_i = FH_i$ si el factor de heterogeneidad es menor o igual a 1 y $P_i = 1/FH_i$ si el factor de heterogeneidad es mayor a 1.

El valor promedio de conductividad hidráulica del acuífero Paraná calculado mediante la Ec. (8) es de 24.8 m/d. Este valor, que es consistente con las características texturales de la formación, lamentablemente no pudo ser contrastado con estimaciones realizadas con otras técnicas ya que no existen valores publicados o que sean de libre acceso. Para el acuífero Puelche se obtuvo un valor medio de conductividad hidráulica de 43.4 m/d. Esta estimación es cercana al valor medio de 30 m/d estimado por Auge (2001) a

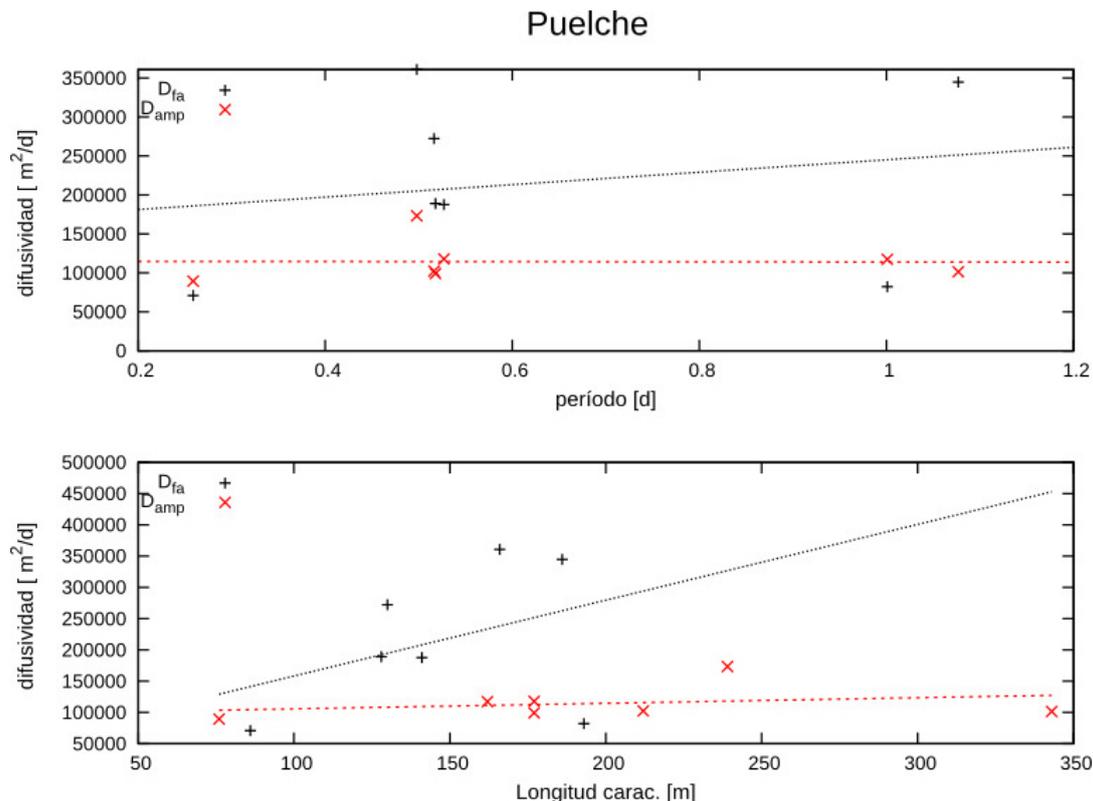


Figura 7. D_{fa} y D_{amp} correspondientes al acuífero Puelche en función del período de las componentes y de la longitud característica. En el gráfico se incluyen tendencias lineales para los valores de D_{fa} y de D_{amp} .

Figure 7. D_{fa} y D_{amp} corresponding to Puelche aquifer as a function of both the period and the characteristic length. Linear trends for D_{fa} y D_{amp} are included.

partir de 26 ensayos de bombeo que arrojaron valores extremos de 9 y 57 m/d.

6. Discusión

La utilización de distintas componentes de marea en el análisis de la señal en el acuífero permite analizar las heterogeneidades en los valores de difusividad y conductividad hidráulica ya que cada componente está asociada a una longitud característica. Por otra parte, el análisis de los factores de heterogeneidad permite establecer hipótesis sobre eventuales variaciones en el espesor del acuífero. En el acuífero Paraná, el aumento de la conductividad hidráulica con el período de la componente, así como con la longitud característica es concluyente, tanto para las estimaciones mediante atenuación como para las realizadas mediante desfase. Esto permite inferir un aumento de la conductividad hidráulica a medida que nos alejamos de la línea de costa. Lamentablemente no se cuenta con estudios realizados en el acuífero Paraná como para contrastar los resultados obtenidos. En el acuífero Puelche, la situación no es concluyente. Si bien

para las estimaciones realizadas mediante desfase se observa un aumento marcado de la conductividad hidráulica con el período y la longitud característica, las estimaciones de difusividad hidráulica mediante atenuación no dependen del período de la componente utilizada.

Por otro lado, el cálculo del factor de heterogeneidad puede ser un indicador de la variación del espesor del acuífero. En trabajos recientes (Cuello *et al.*, 2017; Cuello and Guarracino, 2020) se derivaron soluciones analíticas para el fenómeno de marea inducida considerando un acuífero cuyo espesor disminuya o aumente con la distancia a la costa. El análisis de estas soluciones permitió obtener un posible indicador de acuífamiento, ya que para el caso de aumento del espesor del acuífero con la distancia a la costa se obtienen sistemáticamente factores de heterogeneidad menores a 1. Por otro lado, si el espesor del acuífero disminuye con la distancia a la costa, se obtienen sistemáticamente factores de heterogeneidad mayores a 1. Claro está que, la existencia de factores de heterogeneidad sistemáticamente mayores o menores a 1, no puede asociarse inequívocamente a una variación

Componente	Período (h)	K_{amp} (m/d)	K_{fa} (m/d)	FH
M4	6.21	19.4	9.2	1.46
M2	12.42	33.2	11.9	1.67
MKS2	12.39	26.8	14.4	1.36
K2	11.97	23.5	27.5	0.93
S2	12	46.8	19.6	1.54
NU2	12.63	26.2	16.1	1.27
N2	12.66	38.4	14.1	1.65
Theta 1	23.21	33.3	17	1.4
Phi 1	23.8	61.8	24.2	1.6
S1	24	34.1	14.3	1.54
MP1	25.67	15.4	21.1	0.85
O1	25.82	38.1	16.9	1.5

Tabla 6. Estimaciones de conductividad hidráulica mediante amplitud y desfase correspondiente al acuífero Paraná. Se incluyen en la tabla los valores de FH.

Table 6. Hydraulic conductivity estimates corresponding to Paraná aquifer from amplitude and phase shift. FH values are included.

Componente	Período (h)	K_{amp} (m/d)	K_{fa} (m/d)	FH
M4	6.21	24.7	19.6	1.12
M2	12.42	27.4	52.1	0.72
MKS2	12.39	28.2	75.1	0.61
K2	11.97	47.8	99.6	0.69
N2	12.66	32.5	51.8	0.79
S1	24	32.4	22.7	1.19
O1	25.82	28	95.2	0.54

Tabla 7. Estimaciones de conductividad hidráulica mediante amplitud y desfase correspondiente al acuífero Puelche. Se incluyen en la tabla los valores de FH.

Table 7. Hydraulic conductivity estimates corresponding to Puelche aquifer from amplitude and phase shift. FH values are included.

en el espesor del acuífero, pero puede ser tomado como un posible indicador. En el acuífero Paraná, 10 de un total de 12 factores de heterogeneidad son mayores a 1. Esto podría indicar una disminución de su espesor con la distancia a la costa. Lamentablemente, se cuenta únicamente con el perfil geológico correspondiente al pozo de monitoreo, no pudiéndose contrastar fehacientemente esta hipótesis. En el acuífero Puelche, 5 de un total de 7 factores de heterogeneidad son menores a la unidad. Esto podría indicar un acuñamiento del acuífero mar adentro. Mancino *et al.* (2013) registraron un acuñamiento del acuífero Puelche hacia el mar, lo que está en concordancia con lo obtenido en ese trabajo.

En cuanto a la estimación de un valor de conductividad hidráulica representativa de todo el acuífero, la Ec. (8) representa un promedio ponderado en el cual los factores de heterogeneidad son los pesos. La estimación de la conductividad hidráulica para el acuífero Puelche es consistente con el conocimiento hidrogeológico de la región mientras que el valor promedio obtenido para el acuífero Paraná representa un aporte novedoso al conocimiento hidrogeológico de la zona.

7. Conclusiones

En este trabajo se midió y analizó la marea inducida de origen mecánico en la costa del estuario del Río de La Plata en la localidad de Avellaneda, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Este análisis permitió estudiar el grado de heterogeneidad de los acuíferos Puelche y Paraná y obtener estimaciones de sus conductividades hidráulicas. Para ello se tomaron los espectros de amplitud y de fase de las señales piezométricas, así como del registro mareográfico, y se identificaron las principales componentes de marea.

En cuanto al análisis de la heterogeneidad, se encontró que en el acuífero Paraná existe una relación entre la longitud característica y el valor de conductividad hidráulica estimada mediante atenuación y desfase, lo que permite inferir un aumento de la conductividad hidráulica con la distancia a la costa. Los factores de heterogeneidad indicaron un posible aumento del espesor del acuífero a medida que se acerca a la costa. Para el acuífero Puelche, se obtuvo una dependencia de las estimaciones de conductividad hidráulica mediante atenuación con la longitud característica, no así con las estimaciones mediante desfase. Esto podría indicar un mayor grado de homogeneidad

del acuífero. Los factores de heterogeneidad indicaron un acuñamiento del acuífero hacia el mar.

Por último, se estimó un valor de conductividad hidráulica representativo de los dos acuíferos utilizando las estimaciones de todas las componentes ponderadas por el factor de heterogeneidad. Para el acuífero Paraná se obtuvo un valor de 24.8 m/d y para el acuífero Puelche se obtuvo un valor de 43.4 m/d.

Estos resultados muestran el potencial de la técnica de marea inducida para determinar valores representativos de los acuíferos y tener información adicional sobre posibles heterogeneidades.

Referencias

- Auge, M. P. (2001). Hidrogeología de La Plata-Argentina. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 1, 1.
- Auge, M. P. (2005). Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. In: *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*, pp. 293–311. Quick Press La Plata.
- Auge, M. P., Hernández, M., and Hernández, L. (2002). Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. In *XXXII International Hydrogeology Congress*, pp. 624–633.
- Barlow, P. M., and Moench, A. F. (1999). WTAQ—A computer program for calculating drawdowns and estimating hydraulic properties for confined and water-table aquifers. *Water-resources investigations report*, 99, 4225.
- Blacksmith Institute (2013). The world's worst polluted places. The top ten of the dirty thirty. The remainder of the dirty thirty, 2007. Final Report.
- Carr, P. A., and van der Kamp, G. (1969). Determining aquifer characteristics by the tidal methods. *Water Resources Research*, 5(5), 1023–1031.
- Chattopadhyay, P. B., Vedanti, N., and Singh, V. S. (2015). A conceptual numerical model to simulate aquifer parameters. *Water resources management*, 29, 771–784.
- Cuello, J. E., and Guarracino, L. (2020). Tide-induced head fluctuations in coastal aquifers of variable thickness. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.13873.
- Cuello, J. E., Guarracino, L., and Monachesi, L. B. (2017). Groundwater response to tidal fluctuations in wedge-shaped confined aquifers. *Hydrogeological Journal*, DOI: 10.1007/s10040-017-1579-z.
- D'Onofrio, E., Oreiro, F., and Fiore, M. (2012). Simplified empirical astronomical tide model—An application for the Río de La Plata estuary. *Computers & Geosciences*, 44, 196–202.
- Droque, C., Razack, M., and Krivic, P. (1984). Survey of a coastal karstic aquifer by analysis of the effect

- of the sea-tide: example of the Kras of Slovenia, Yugoslavia. *Environmental Geology and Water Sciences*, 6(2), 103-109.
- Erskine, A. D. (1991). The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK. *Groundwater*, 29(4), 556-562.
- Ferris, J. G. (1951). Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. *International Association of Scientific Hydrology*, 33, 148-155.
- Guarracino, L., Carrera, J., and Vázquez-Suñé, E. (2012). Analytical study of hydraulic and mechanical effects on tide-induced head fluctuation in a coastal aquifer system under the sea. *Journal of Hydrology*, 450-451, 150-158.
- Guarracino, L., and Monachesi, L. B. (2014). An analytical solution of tide-induced head fluctuations in an inhomogeneous coastal aquifer. *Lecture Notes in Earth System Sciences*, pp. 475-480.
- Guo, H., Jiao, J. J., and Li, H. (2010). Groundwater response to tidal fluctuations in a two-zone aquifer. *Journal of Hydrology*, 381, 364-371.
- Jacob, C. E. (1950). Flow of groundwater. In: H. Rouse (ed.), *Engineering hydraulics*. Wiley, New York, pp 321-386.
- Jha, M. K., Kamii, Y., and Chikamori, K. (2003). On the estimation of phreatic aquifer parameters by the tidal response technique. *Water Resources Management*, 17, 69-88.
- Jiao, J. J., and Tang, Z. (1999). An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer. *Water Resources Research*, 35(3), 747-751.
- Li, H., and Jiao, J. J. (2001). Analytical studies of groundwater head fluctuation in a coastal confined aquifer overlain by a semi-permeable layer with storage. *Advances in Water Resources*, 24, 565-573.
- Lo, W.-C., Yeh, C.-L., and Tsai, C.-T. (2007). Effect of soil texture on the propagation and attenuation of acoustic wave at unsaturated conditions. *Journal of hydrology*, 338(3-4), 273-284.
- Millham, N. P., and Howes, B. L. (1995). A comparison of methods to determine K in a shallow coastal aquifer. *Groundwater*, 33(1), 49-57.
- Monachesi, L. B., and Guarracino, L. (2011). Exact and approximate analytical solutions of groundwater response to tidal fluctuations in a theoretical inhomogeneous coastal confined aquifer. *Hydrogeology Journal*, 19, 1443-1449.
- Parker, G. (1990). Estratigrafía del Río de La Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 45(3-4), 193-204.
- Rinaldi, V. A., and Abril, E. G. (2006). Aspectos geotécnicos fundamentales de las formaciones del delta del Río Paraná y del estuario del Río de La Plata. *Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, 6(2).
- Rotzoll, K., El-Kadi, A. I., and Gingerich, S. B. (2008). Analysis of an unconfined aquifer subject to asynchronous dual-tide propagation. *Ground Water*, 46, 239-250.
- Rotzoll, K., Gingerich, S. B., and El-Kadi, A. I. (2013). Estimating hydraulic properties from tidal attenuation in the northern Guam Lens Aquifer, territory of Guam, USA. *Hidrogeology Journal*, 21, 643-654.
- Trabucchi, M., Carrera, J., and Fernández-García, D. (2018). Generalizing Agarwal's method for the interpretation of recovery tests under non-ideal conditions. *Water Resources Research*, 54(9), 6393-6407.
- Trefry, M. G., and Bekele, E. (2004). Structural characterization of an island aquifer via tidal methods. *Water Resources Research*, 40, 1-21.
- van der Kamp, G. (1972). Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea. In: *International Geological Congress (Vol. 24, No. 11, pp. 101-106)*. Montreal: Quebec.
- van der Kamp, G., and Gale, J. E. (1983). Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. *Water Resources Research*, 19(2), 538-544.
- Yeh, H.-D., and Huang, Y.-C. (2009). Analysis of pumping test data for determining unconfined-aquifer parameters: Composite analysis or not? *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1133-1147.
- Zhou, X., Song, C., Li, T., Chen, R., Zhang, H., Zhao, J., and Cao, Q. (2015). Estimation of aquifer parameters using tide-induced groundwater level measurements in a coastal confined aquifer. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2197-2204.

