

Análisis de la futura intrusión salina en un acuífero costero como respuesta al cambio climático. Partido de la Costa, provincia de Buenos Aires

Carretero, Silvina¹; John Rapaglia²; Eduardo Kruse¹

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET). Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Cátedra de Hidrología General. Calle 64 n° 3, (1900) La Plata. Buenos Aires. Argentina. scarretero@fcnym.unlp.edu.ar; kruse@fcnym.unlp.edu.ar

² 'The Future Ocean' Excellence Cluster, Christian Albrechts University, Institute of Geography Ludwig-Meyn-Str.14, 24098 Kiel, Germany. rapaglia@geographie.uni-kiel.de

► **Resumen** — De acuerdo al cuarto informe del IPCC el aumento del nivel del mar sería uno de los efectos más importantes del cambio climático global y la intrusión salina en los acuíferos costeros representaría un impacto significativo en tal sentido. La metodología propuesta por Werner y Simmons (2009) siguiendo a Custodio (1987) fue utilizada para cuantificar el avance salino en el acuífero costero del Partido de La Costa, Buenos Aires, Argentina. El modelo de flujo constante, en donde la lente de agua dulce no disminuye el espesor pero se produce una elevación de los niveles, sugiere que la intrusión salina avanzará en 25, 33 y 38 metros dependiendo de los escenarios de recarga y considerando 1 metro de aumento del nivel del mar. Los resultados del modelo a carga hidráulica constante, el cual se basa en la reducción del espesor del acuífero con el aumento del nivel del mar, muestran una intrusión de la cuña salina mucho mayor, siendo 193, 199 y 211 metros para los parámetros utilizados. Si se cumple el modelo de flujo constante el acuífero no estaría muy afectado según los diferentes escenarios de variaciones de nivel del mar y consumo de agua. Si el modelo es a carga hidráulica constante, lo cual sería más probable debido a la baja topografía de la zona, el avance de la intrusión salina mayor a 200 metros degradaría severamente el acuífero forzando a los tomadores de decisiones a una gestión más cuidadosa del agua dulce para abastecimiento a los habitantes.

Palabras clave: Cambio climático, intrusión salina, acuífero costero.

► **Abstract** — "Analysis of future saline intrusion in a coastal aquifer as a response to climate change. Partido de la Costa, Buenos Aires province". According to the IPCC fourth assessment report, sea level rise would be one of the more certain effects of global climate change and salt water intrusion into coastal aquifers would be an important impact of sea level rise. The methodology proposed by Werner and Simmons (2009) following Custodio (1987) was used to quantify the increase in salt water intrusion length into the coastal aquifer at Partido de la Costa, Buenos Aires, Argentina. The flux-controlled model, which does not decrease the freshwater lens but shifts it upward, suggests that the salt water intrusion length will increase by 25, 33 and 38 meters depending on aquifer recharge scenarios and considering a one meter sea level rise. Results from the head-controlled model, which is based upon a reduction in the size of the aquifer with sea level rise, show a much greater increase in the salt water intrusion length of 193, 199 and 211 meters for the used parameters. If the constant-flux model is met the coastal aquifer under investigation will not be greatly affected by different sea level rise or water consumption scenarios. However, if the constant-head model is the case, which is more likely due to the low elevation of the land surface, an increase in salt water intrusion length by more than 200 meters will severely degrade the aquifers, forcing coastal managers to adopt a careful freshwater management for the resident's water supply.

Keywords: Climate change, salt water intrusion, coastal aquifer.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al Cuarto Informe de evaluación del IPCC (2007) («Intergovernmental Panel on Climate Change») el aumento del nivel del mar sería uno de los efectos más evidentes del cambio climático.

La intrusión salina en acuíferos costeros consecuencia del aumento del nivel del mar, sería un impacto importante y ha recibido especial atención en la comunidad científica en los últimos años (Döll 2009, Ranjan *et al.* 2009, Sherif and Singh 1999, Werner and Simmons 2009).

Los acuíferos costeros tienen una fuerte conexión hidráulica con el mar. La alta porosidad y conductividad hidráulica favorecen la penetración del agua marina por la base del acuífero. Ghyben (1888) y Herzberg (1901) sitúan a la interfase a una profundidad 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en ese punto. Si se produce un aporte de agua salada, y la lente de agua dulce no puede migrar, ésta se reduciría afectando la cantidad de agua potable disponible.

Debido a que los acuíferos costeros son muchas veces la fuente principal (o la única) de agua dulce para los habitantes, es importante entender cómo los cambios en el nivel del mar impactarán sobre la calidad del agua subterránea.

Sumado al ascenso del nivel del mar, existe un incremento en la población y por lo tanto, en la demanda de agua potable, lo cual aumenta la vulnerabilidad del agua subterránea ante la intrusión salina.

El objetivo de este trabajo es analizar cómo el futuro cambio climático afectará la relación entre el agua dulce y el agua de mar en el acuífero costero del Partido de La Costa, Buenos Aires. Se incluye la cuantificación del avance de la intrusión salina de acuerdo a diferentes escenarios de ascenso del nivel del mar, considerando el incremento de la población y el consumo de agua.

ÁREA DE ESTUDIO: CARACTERÍSTICAS GENERALES E HIDROGEOLÓGICAS

El área de estudio abarca el Partido de La Costa (Figura 1), entre Punta Rasa y Punta Médanos y se localiza sobre un sistema de barreras que desarrolla una franja de dunas costeras que aumentan su expresión topográfica de norte a sur. La población actual es del orden de los 70.000 habitantes (INDEC, 2010) que dependen en un 100% del acuífero costero para suplir la demanda del agua potable.

El ambiente estudiado pertenece a la Región Costera (González, 2005) en donde se reconocen dos ambientes geomorfológicos: cordón costero y llanura continental, que condicionan el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico de las aguas subterráneas (Carretero y Kruse, 2009). El cordón costero se extiende desde Punta Rasa hacia el sur con un ancho promedio de 2 km hasta Punta Médanos donde alcanza los 4 km. Se caracteriza por la presencia de sedimentos compuestos por arenas finas que disminuyen el tamaño de grano de sur a norte (Spalletti y Mazzoni, 1979). La llanura continental se desarrolla al oeste del cordón costero con cotas inferiores a 5 msnm, predominan los materiales limosos y arcillosos con zonas de escasa pendiente, inundable, y presenta cañadones en dirección sudeste-noroeste por donde drenan lentamente las aguas hacia la Bahía de Samborombón. (Consejo Federal de Inversiones, 1989)

El acuífero de agua dulce está constituido por un manto arenoso, de espesor variable entre 5 y 18 m y limitado por dos interfases, hacia el continente agua dulce-agua salobre y hacia el mar, agua dulce-agua salada.

Por debajo existe una unidad acuitardo/acuícludo compuesta de arcillas y arcillas arenosas (2-2,5 m), un sistema acuífero semiconfinado arenoso y con arenas limoarcillosas que contiene agua dulce en el sector sur y hacia el norte, agua de alta salinidad. Desde Las Toninas hacia Punta Rasa desaparece transformándose en un acuitardo/acuícludo con lentes de agua de elevada salinidad. Por último el basamento hidrogeológico

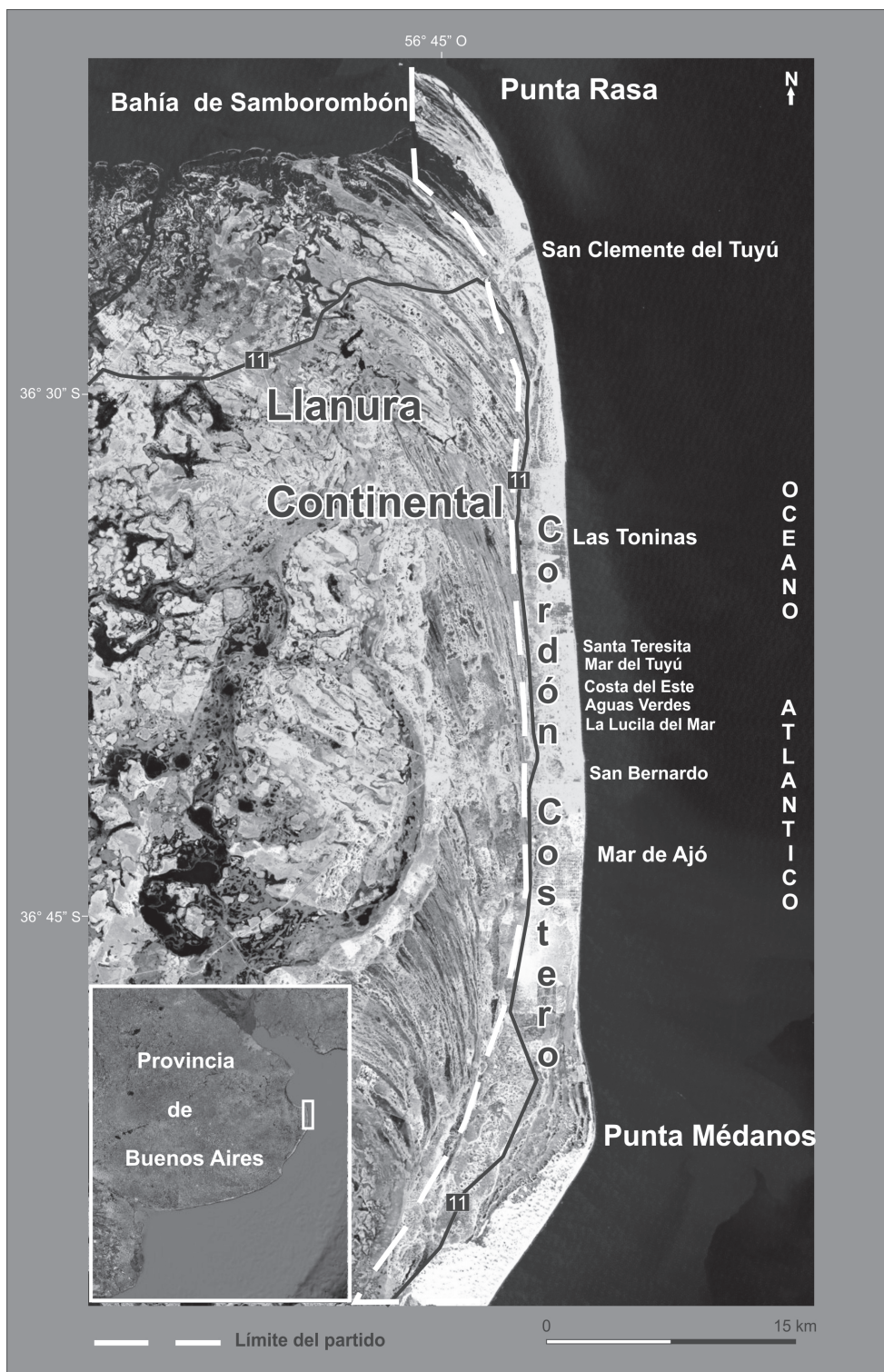


Figura 1. Mapa de ubicación.

se caracteriza por arcillas plásticas (González Arzac *et al.*, 1992).

La recarga al sistema hidrogeológico se origina por los excesos de las precipitaciones (1000 mm/año) y se estima en 230 mm/año.

Climáticamente la región, según la clasificación de Thornthwaite, es de tipo húmedo; mesotermal (templado); con nulo a pequeños déficit de agua, y concentración estival de la eficiencia térmica menor del 48 % (Consejo Federal de Inversiones, 1990). El 60% de las precipitaciones ocurre de octubre a marzo. La temperatura media anual es de 14,5 °C, la humedad relativa promedio es del 85%. La frecuencia de vientos es muy variable, aunque predomina la dirección este.

METODOLOGÍA

Se siguió la metodología propuesta por Werner y Simmons (2009) a partir de Custodio (1987) (Figura 2).

Si se utilizan los parámetros hidrogeológicos conocidos y estimando el crecimiento de la población se calculó, a partir de la ecuación 1, la magnitud del avance de la futura intrusión salina planteándose diferentes valores de aumento del nivel del mar considerando un escenario máximo de 1 m:

$$x_T = \frac{q_0}{W} - \sqrt{\frac{q_0^2}{W^2} - \frac{K(1+\alpha)z_0^2}{W\alpha^2}} \quad (1)$$

Donde:

X_T : El extremo de la cuña salina que está localizada en la intersección entre la interfase y la base del acuífero. X_T representa la distancia de penetración del agua salada hacia el continente al acuífero freático.

q_0 : descarga al mar

W : recarga

Z_0 : profundidad del acuífero debajo del nivel del mar. Está influenciado por el incremento del nivel del mar que deriva en cambios de la línea de costa (por ej. Z_0 se incrementa en igual proporción al ascenso del nivel del mar).

K : conductividad hidráulica

α : relación de densidades agua dulce-agua salada $\rho_f / (\rho_s - \rho_f)$. Normalmente se asume el valor 40.

Se utilizaron dos modelos para calcular la longitud de la intrusión salina: flujo constante y carga hidráulica constante.

– Flujo constante («flux-controlled systems»): en donde la descarga del agua subterránea (q_0) es constante a pesar del aumento del nivel del mar.

En estos casos los niveles freáticos (h_i) aumentan a la misma tasa que el nivel del mar, manteniendo las condiciones de descarga constantes, minimizando los efectos de la intrusión marina.

Se calculó h_i en x mediante la ecuación 2:

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{2}{K}(x - x_T)\left(q_0 - \frac{W}{2}(x + x_T)\right) + (h_T + z_0)^2\right)}$$

$$h_T = \frac{z_0}{\alpha} \quad (2)$$

– Carga hidráulica constante («Head-controlled systems»): en donde la carga hidráulica (h_i) es constante a pesar del aumento del nivel del mar.

Para que esto suceda se produce una reducción del flujo de descarga hacia el mar. En estos casos los drenajes, arroyos/ríos, humedales, evapotranspiración y la explotación del agua subterránea pueden inhibir el ascenso de los niveles freáticos asociados al incremento del nivel del mar.

Para este modelo se calculó la descarga q_i utilizando la ecuación 3.

$$q_i(x) = q_0 - W_x \quad (3)$$

En donde x es la distancia desde la divisoria a la línea de costa y se consideró 1 km, como un valor promedio, para la zona de estudio.

Se analizó Δx_T en función del aumento del nivel del mar de acuerdo a los dos modelos. Se consideraron diferentes valores de re-

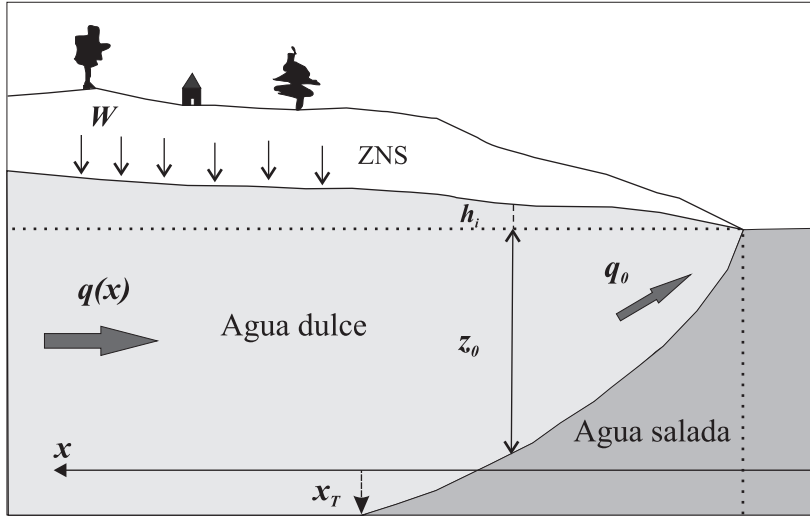


Figura 2. Esquema conceptual del sistema de análisis.

carga (W) que fue modificada de acuerdo a la tasa media de consumo por habitante estimada en 200 L/d. Se adoptaron valores medios para el área de K igual a 20 m/d, Z_0 de 10 m y q_0 de 0,4 m²/d.

RESULTADOS

Mediante la aplicación de la ecuación 1 para el modelo de flujo constante se calcularon los valores de Δx_T considerando diferentes instancias de recarga (Figura 3). Con una recarga natural de 230 mm/a el avance de la intrusión salina sería de 25 m. Si a la recarga natural se le resta la extracción de agua para el consumo de los habitantes al año 2010, la recarga disminuye a 203 mm/a en cuyo caso el avance de la cuña salina alcanzaría los 33 m. Por último en un escenario proyectado para 100.000 habitantes con una recarga de 194 mm/a se estima en 38 m.

A partir de la ecuación 2, se calculó que para que q_0 se mantenga constante a pesar del aumento del nivel del mar, h_i (en $x = 1$ km) aumentaría en 0,1 m para 0,1 m de incremento y 0,99 m para el escenario proyectado de 1 m de ascenso del nivel de las aguas marinas.

La ecuación 1 también fue aplicada al modelo de carga hidráulica constante, así

como los mismos escenarios de variación de la recarga. Se obtuvieron valores de Δx_T de 193 m, 199 y 211 m para los 230, 203 y 194 mm/a de recarga respectivamente (Figura 4).

Mediante la ecuación 3 se estimó que para que el valor de h_i se mantenga constante a pesar del aumento del nivel del mar, q_0 disminuiría en un 0,84% para 0,1 m de incremento y en un 77,4% para el máximo proyectado de 1 m.

CONCLUSIONES

Con la información disponible se cuantificó el grado de avance de la intrusión salina debida al aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático en el Partido de La Costa.

En el modelo de flujo constante, el acuífero costero estaría afectado en menor proporción, con valores de avance de la intrusión marina no mayores a 38 m, de acuerdo a los valores de recarga considerados para los diferentes escenarios. Si bien todo tipo de manejo de extracción de agua dulce en zonas costeras debe ser correctamente gestionado, para el modelo de flujo constante, no habría que realizar grandes ajustes como consecuencia del aumento del nivel del mar.

Sin embargo, si el modelo de carga hidráulica constante es el caso, lo cual es más

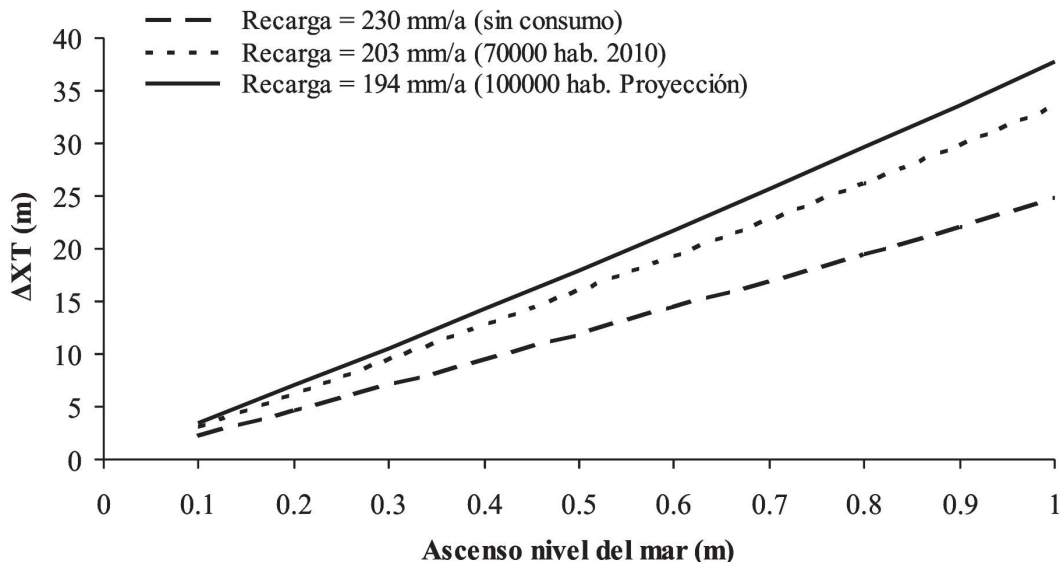


Figura 3. Modelo de flujo constante: Δx_T vs. aumento del nivel del mar, con variaciones en la recarga (x_T es el extremo de la cuña salina).

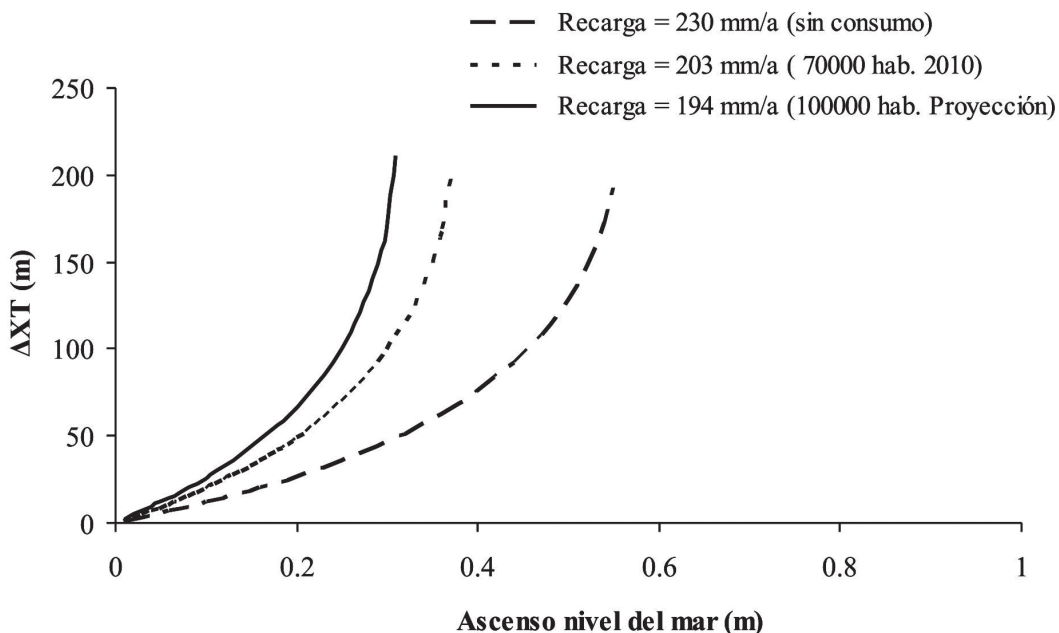


Figura 4. Modelo de carga hidráulica constante: Δx_T vs. aumento del nivel del mar, con variaciones en la recarga (x_T es el extremo de la cuña salina).

probable debido a la escasa elevación topográfica, se produciría un incremento de la cuña salina de más de 200 m, lo cual degradaría el acuífero y sería necesaria una ges-

ción más cuidadosa del agua dulce para abastecimiento a los habitantes.

El incremento de la población se proyectó hasta los 100.000 habitantes, con lo cual

el acuífero freático de agua dulce estaría fuertemente afectado con solo 0,31 m de elevación del nivel del mar.

Un crecimiento mayor, asociado a una tasa de consumo de agua mayor afectarían al acuífero con menores valores de incremento en el nivel medio del mar, resultando en una situación de riesgo a menor plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Carretero S. y Kruse E. 2009. Evaluación espacio-temporal de la calidad química del agua subterránea en el sector norte del Partido de la Costa, Provincia de Buenos Aires. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut. Resumen pp 47. Trabajo completo en CD.
- Consejo Federal de Inversiones. 1989. Evaluación del recurso hídrico subterráneo de la región costera atlántica; región I: Punta Rasa. Punta Médanos, provincia de Buenos Aires; Prospección geoelectrónica en la costa Atlántica de la provincia de Buenos Aires entre Punta Rasa y Punta Médanos. 33 p.
- Consejo Federal de Inversiones. 1990. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Región I Punta Rasa-Punta Médanos. Informe Final Tomo IV Caracterización climática y Balance Hidrológico. 177 p.
- Custodio, E. 1987. Prediction methods. Chapter 8. In Studies and Reports in Hydrology: Groundwater Problems in Coastal Areas, ed. G.A. Bruggeman and E. Custodio. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris, 595 pp.
- Döll, P. 2009. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letters* 4 (3): 12 pp.
- Ghyben, B. W. 1888. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam (Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam). *Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs*: 8-22. The Hague.
- González, N. 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En: R. de Barrio, R. Etcheverry, M. Caballé and E. Llambías (eds): *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*: 359-374. La Plata, Buenos Aires.
- González Arzac, R.; Vizcaino, A.; Campos Alfonso, F. 1992. Acuíferos costeros de la provincia de Buenos Aires; sector Punta Rasa - Punta Médanos, parte I, hidrogeología, hidrodinámica e hidráulica. Buenos Aires; CFI; [Serie investigaciones aplicadas, 4] 36 p.
- Herzberg, A. 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder (The water supply on parts of the North Sea coast in Germany). *Journal Gabelleucht und Wasserversorgung* 44: 815-819, 824-844.
- INDEC 2010. Censo Nacional de población, hogares y viviendas. Resultados provisionales, cuadros y gráficos. http://www.censo2010.indec.gov.ar/preliminares/cuadro_resto.asp
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. A. M. Tignor and H. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Ranjan, S. P., Kazama, S., Sawamoto, M., y Sana, A. 2009. Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources. *Ocean & Coastal Management* 52: 197-206.
- Sherif, M. M. y Singh V. P. 1999. Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Processes* 13 (8): 1277-1287.
- Spalletti L. A. y Mazzoni M. M. 1979. Caracteres granulométricos de arenas de playa frontal, playa distal y médano litoral atlántico bonaerense. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* XXXIV 1: 12-30.
- Werner, A. D. y Simmons C. T. 2009. Impact of sea level rise on seawater intrusion in coastal aquifers. *Ground Water* 47 (2): 197-204.