

IMPACTO DE LA FRANJA CAPILAR EN EL ÁREA URBANA DE BAHÍA BLANCA

Leonardo Scherger¹ y Claudio Lexow^{1,2}

¹ CGAMA-CIC de la Prov. de Bs. As. San Juan 670. (8000) Bahía Blanca.

² Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur (UNS). Av. Alem 1253. (8000) Bahía Blanca, Argentina.

leonardo.scherger@uns.edu.ar

Resumen

El objetivo de este estudio es evaluar la hidrodinámica de la Zona no saturada (ZNS) en diferentes sectores de la Ciudad de Bahía Blanca, haciendo hincapié en el comportamiento de la franja capilar (FC). Se pretende determinar la influencia del flujo no saturado ascendente en el comportamiento de las estructuras de hormigón, entre otras causas. A partir de datos de campo antecedentes correspondientes al periodo 2011-2017, se realizaron simulaciones numéricas de la hidrodinámica natural del sistema no saturado mediante la aplicación del Código HYDRUS 2D/3D. Se evaluaron tres perfiles ubicados en puntos estratégicos, correspondientes a estaciones de servicio y expendio de combustible. Los resultados alcanzados en la simulación permiten establecer una FC de escaso espesor para el área céntrica, la cual mantiene condiciones mayormente estáticas, sin o con escasa influencia de las variables superficiales. Por otro lado en el sector Sudoeste de la ciudad donde se presentan suelos de textura fina y un acuífero freático hipersalino somero, se estima un espesor de la FC de hasta 110 cm, en equilibrio con presiones capilares de -100 cm. Los niveles superficiales de la ZNS se encuentran influenciados por la posición del nivel freático. Estos sectores representan un potencial peligro, tanto desde el punto de vista ingenieril como ambiental.

Palabras Claves: franja capilar – acuífero freático – Bahía Blanca

Abstract

The objective of this study is to evaluate the vadoze zone (VZ) hydrodynamics in different sectors of Bahía Blanca city, emphasizing the behavior of the capillary fringe (CF). It is intended to determine the influence of rising unsaturated flow on the behavior of concrete structures, among other causes. From background field data corresponding to the 2011-2017 period, numerical simulations of the unsaturated system natural hydrodynamics were carried out using the HYDRUS 2D / 3D Code. Three profiles located at strategic points, corresponding to gas stations were evaluated. The results obtained in the simulation allow establishing a CF of little thickness for the centric area, which maintains mostly static conditions, without or with scarce influence of the atmospheric variables. On the other hand, in the Southwest sector of the city where there are fine-textured soils and a shallow hypersaline phreatic aquifer, a CF thickness of up to 110 cm is estimated, in equilibrium with tension heads of -100 cm. The surface levels of the VZ are influenced by the position of the water table. These sectors represent a potential danger, both from the engineering and environmental point of view.

Key words: capillary fringe–phreatic aquifer– Bahía Blanca

INTRODUCCIÓN

El subsuelo de la ciudad de Bahía Blanca se caracteriza por presentar variaciones en sus cualidades sedimentológicas, lo que otorga un comportamiento hidrodinámico característico para cada sector de la localidad. El flujo de transferencia vertical de humedad en el suelo es determinado por las variaciones de potencial hidrodinámico total, siendo la evapotranspiración y el fenómeno de capilaridad los promotores del flujo ascendente, mientras que las fuerzas gravitatorias controlan la infiltración y percolación hacia el acuífero. En determinados sectores de la localidad, la posición del nivel freático mantiene una influencia directa sobre la hidrodinámica del sistema (Lexow *et al.* 2017), donde el espesor

de la FC queda determinado por las características litológicas y las condiciones hidrométricas.

Las infraestructuras de hormigón en determinados sectores presentan graves deterioros (grietas y fracturas), posiblemente relacionadas entre otras causas, al aporte de sales en los niveles superficiales del suelo desde el acuífero hipersalino subyacente. Por otro lado, la ocurrencia de pérdidas de hidrocarburos desde tanques soterrados, representa un gran peligro ambiental para la salud pública, siendo la FC el sitio físico donde tiene lugar la movilidad de la fase líquida no acuosa (FLNA). La caracterización y descripción de la FC resulta fundamental para una correcta planificación urbana.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el comportamiento de la FC, dentro del contexto urbano de Bahía Blanca, como su relación con la hidrodinámica local del sistema no saturado en diferentes sectores de la ciudad. La dinámica del sistema fue simulada para el periodo 2011 – 2017 mediante la aplicación del Código HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.* 2006). La metodología de trabajo se sustenta en experiencias afines como las de Ajdary (2008), Kandelous y Simunek (2010), Lexow (2010), Lexow *et al.* (2017), Askri *et al.* (2014), y Scherger (2017), entre otras.

MARCO HIDROGEOLÓGICO

El acuífero freático de la ciudad de Bahía Blanca, se caracteriza por presentar condiciones hidrogeológicas muy variables. En el sector acotado entre la margen derecha del A° Napostá y hasta aproximadamente la cota de 10 m.s.n.m., existe un conjunto de sedimentos cuya potencia puede alcanzar los 10 metros, que corresponden a la Formación Bahía Blanca, de edad Holoceno (Fidalgo, 1983). Están identificados por arenas medias a finas friables de composición calcárea y sin estratificación que alternan con arenas gruesas y gravas con rodados de cuarcitas y conchillas de moluscos continentales. Constituyen paleocanales dentro de antiguas llanuras de inundación de los A° Napostá Grande y Maldonado. En este sector, la profundidad del nivel freático oscila entre los 3 y 5 m dependiendo de la época del año y de la alternancia anual de los ciclos pluviométricos. Hacia el sector sudoeste, en cercanías a la costa y por debajo de la cota de 10 m.s.n.m., yace en discordancia erosiva un nivel arenoso, innominado, de edad Pleistocena (Chaar *et al.* 1992) constituido por arenas de playa cementadas por carbonato de calcio con abundantes restos de conchillas. Sobre éstos se disponen sedimentos marinos correspondientes a la Formación Maldonado (Fidalgo, 1983), de edad Pleistoceno Superior – Holoceno. Corresponden a una sucesión granodecreciente con arena mediana a fina sobre la base que pasan transicionalmente a arenas limosas, a limos arenosos y a arcillas limosas hacia la parte superior. El acuífero costero libre se encuentra contenido por la Formación Maldonado conjuntamente con los sedimentos pampeanos (Fidalgo, 1975), quienes forman el piso de los canales de navegación del estuario de Bahía Blanca. Aunque existen diferencias en sus características litológicas, ambas pueden ser consideradas como una única unidad hidrogeológica. El nivel freático en el área costera, catalogado como hipersalino por Bonorino y Sala (1983), mantiene profundidades someras en la mayor parte del año, formando anegaciones temporales durante los periodos húmedos de máxima expresión.

METODOLOGÍA

Fueron analizados tres sectores de la Ciudad de Bahía Blanca, referentes a una transecta de dirección noreste-sudoeste, desde el área céntrica hacia la zona costera (Fig. 1). Los sitios de análisis corresponden a estaciones de servicio y expendio de combustible. Los perfiles litológicos y las características del acuífero freático son extraídos de datos bibliográficos preexistentes y pozos de monitoreo instalados en cada ubicación (MBB, 2016). Los datos climáticos, correspondientes a la serie 2011 – 2017, se obtuvieron de una estación meteorológica ubicada dentro del predio industrial.

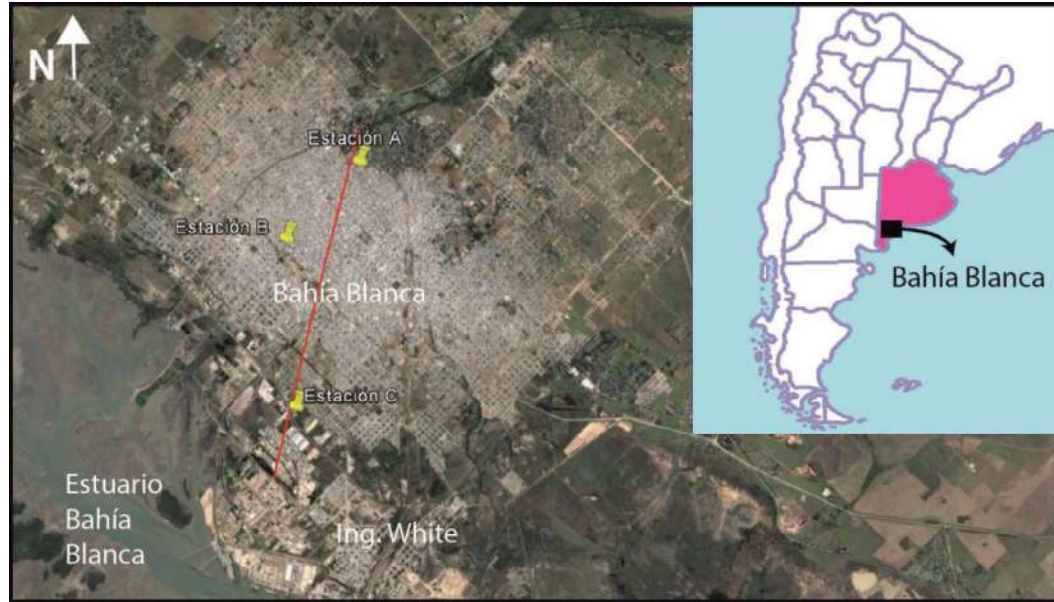


Figura 1: Imagen satelital del área de estudio. Se indica la ubicación de las estaciones de servicio relevadas.

El modelo hidrodinámico del sistema no saturado se realizó mediante la aplicación del software HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.* 2006). El código HYDRUS ejecutable en ambiente Windows, resuelve la ecuación de Richards para el flujo no saturado en determinada sección de estudio, según condiciones iniciales y de borde establecidas por el usuario. La ecuación de Richards modificada, que adhiere un término sumidero para incorporar la extracción de agua por raíces, es resuelta mediante el método de elementos finitos. Las simulaciones realizadas en base a datos antecedentes y bibliográficos fueron validadas mediante la representación de condiciones similares a los valores actuales de campo.

Elaboración del Modelo

El periodo de simulación consistió en 2451 días, iniciando el 01/01/2011 y finalizando el 31/12/2017. La discretización del tiempo fue la siguiente: paso de tiempo inicial de 0,01 (día), paso mínimo 1e-003 (día) y máximo 1 (día). El modelo hidráulico elegido para la simulación fue el propuesto por Van Genuchten-Mualem [1] (Van Genuchten, 1980, Mualem, 1976).

$$Se = 1 + [(\alpha h)^n]^{-m} \quad [1]$$

Donde $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ es la humedad efectiva, $\alpha = h_a^{-1}$ es un parámetro empírico determinado por la inversa del valor de entrada de aire, h corresponde a la tensión matricial y n y m , son parámetros empíricos siendo $m = 1 - 1/n$. La conductividad hidráulica [2] se estima mediante la ecuación:

$$K(Se) = K_s Se^l \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad [2]$$

Donde K_s corresponde a la conductividad hidráulica saturada y l es la conductividad de poro para el cual se sugiere un valor de 0,5 por Mualem (1976) tras numerosos ensayos en varios suelos.

Las condiciones iniciales fueron introducidas en términos de presión matricial, con un valor de -100 cm. El límite superior de la sección, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo,

dominado por la precipitación diaria y la evapotranspiración potencial de referencia que fue estimada por el método de Penman-Monteith modificado según la FAO N° 56 (1998) (Fig. 2). Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que para el límite inferior se considera un potencial constante, $h = 0$ cm, representativo de un nivel freático estático, considerando la profundidad de oscilación media para cada pozo. Los parámetros hidráulicos, estimados mediante la función de pseudotransferencia Rosseta Lite (V1.1) (Schapp *et al.* 2001), como la profundidad del nivel freático (pnf) en cada caso son presentados en la tabla 1. Se introduce el termino de extracción de agua por raíces bajo el modelo de Feddes *et al.* (1978, en Simunek *et al.* 2006), considerando una cubierta herbácea de profundidad de raíces somera.

Tabla 1: Parámetros hidráulicos utilizados en cada sección estudio

Sitio	Litología	Θ_s	Θ_r	α	n	K_s (cm/día)	pnf (m)
Estación A	0 - 4m Arena fina limosa	0.4122	0.0268	0.0234	1.4314	71.14	4
Estación B	0 - 2m Franco Limoso	0.45	0.067	0.02	1.41	10.8	2,6
	2 - 2,6m Arena fina arcillosa	0.39	0.1	0.059	1.48	31.44	
Estación C	0 - 1,4 m Limo arcilloso	0.43	0.089	0.01	1.23	1.68	1,4

RESULTADOS

Comportamiento Hidrodinámico

Estación A

Se ubica en el sector Centro-Norte de la ciudad. En esta zona se desarrolla el espesor no saturado de mayor potencia, encontrándose el nivel freático alrededor de los 4 m de profundidad. El comportamiento hidrodinámico es mayormente de carácter pseudoestático, donde la transferencia de humedad queda restringida a los primeros centímetros del suelo, sujeta a los fenómenos atmosféricos externos (Fig. 2). En profundidad las variaciones de humedad son escasas, existiendo únicamente eventos de recarga al acuífero durante periodos de gran pluviometría, lo que permite la preponderancia de flujos verticales descendentes (Fig. 3a).

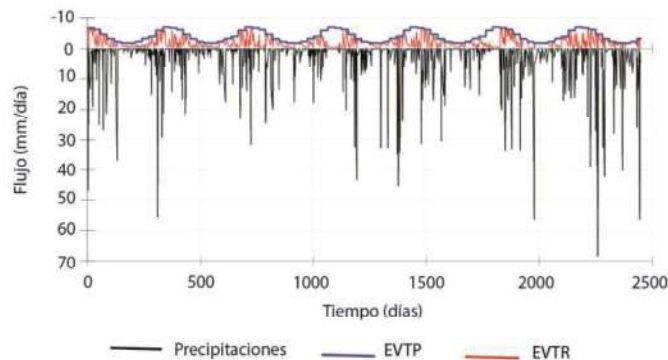


Figura 2: Flujos atmosféricos para el periodo de simulación 2011 – 2017. Las variables precipitación y EVTP son normales en las tres ubicaciones elegidas.

Estación B

El perfil B se correlaciona con las características del subsuelo del sector central de la ciudad. El espesor no saturado es de 2,6 m aproximadamente, constituido por material franco limoso en su porción superior y arena fina arcillosa subyacente. La franja de evapotranspiración, donde ocurren los cambios más extremos de humedad se aloja hasta

los 40 cm de profundidad aproximadamente. Para este perfil el rasgo más notable es el contraste de humedad entre ambas litologías encontrado a los 2 m de profundidad, donde para la misma condición de presión matricial, el nivel superior presenta contenidos de humedad mayores que el inferior (Fig. 3b). Los vectores de flujo, determinados por las condiciones de presión hidrodinámica total, reflejan un predominio de movimientos verticales ascendentes, los cuales únicamente se tornan descendentes por la existencia de frentes de humedad que infiltran desde la superficie.

Estación C

Se ubica en el sector Sudoeste de la ciudad, en cercanías del sector costero, donde se presentan suelos de textura fina y un acuífero libre somero hipersalino. Estas características promueven el desarrollo de una FC de mayor espesor, donde la hidrodinámica natural mantiene una relación estrecha con la posición del nivel freático. Los niveles superficiales, sujetos a las condiciones atmosféricas, presentan un rango de variabilidad de contenido de humedad de entre $0,21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en periodos secos y de $0,43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ durante periodos lluviosos, que generan la saturación superficial del suelo (Fig. 4). La escasa profundidad del nivel freático mantiene un control efectivo sobre la presión matricial y los contenidos de humedad del sector no saturado.

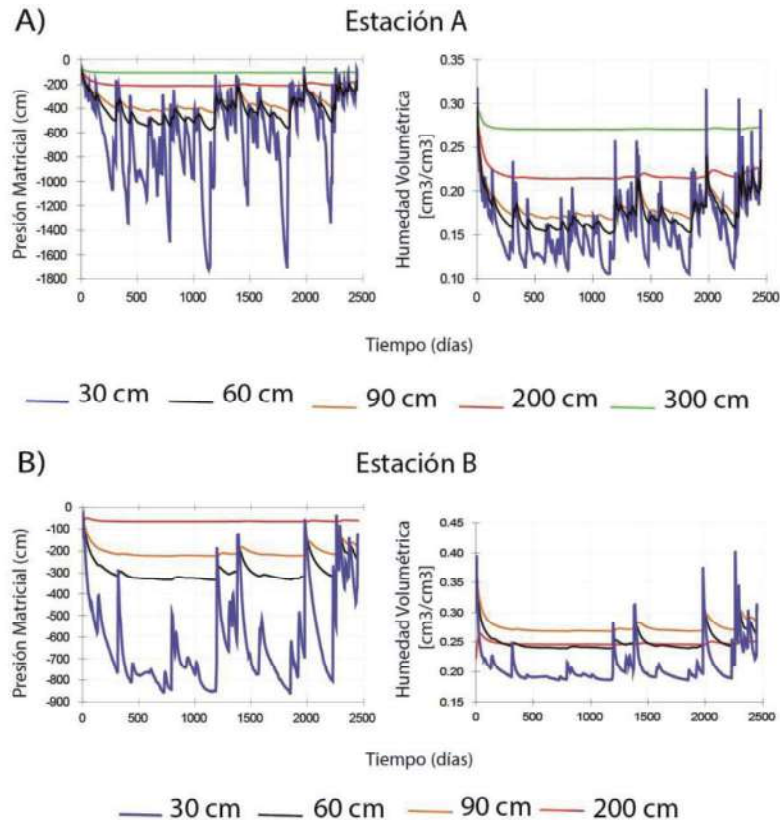


Figura 3: Simulaciones de tensión matricial y contenido volumétrico de humedad. A) Estación A. B) Estación B.

Caracterización de la Franja Capilar

La FC comprende una zona de transición del sistema no saturado con el acuífero freático, en el cual la totalidad de los poros del sistema se encuentran saturados estableciendo una continuidad en el sistema de flujo de agua. En esta zona la presión de fluidos es negativa, considerándose que el agua se encuentra bajo tensión (Freeze y Cherry, 1979). La FC puede ser estimada aproximadamente a partir del valor de presión de entrada

de aire (h_a), el cual mantiene una relación inversa con el coeficiente hidrodinámico α . Al relacionar la curva de retención de humedad (CRH) de cada material en particular con el valor de h_a es posible determinar el contenido volumétrico en equilibrio con dicho sector.

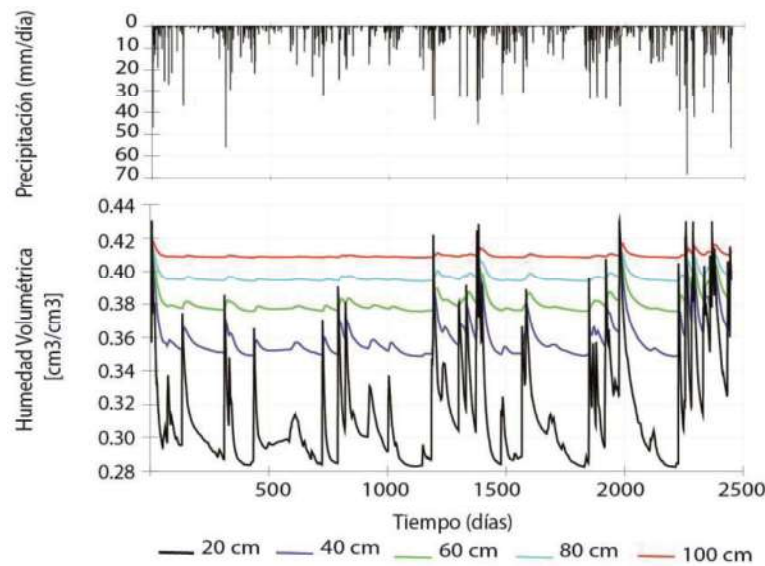


Figura 4: Contenido volumétrico para las diferentes profundidades de observación, estación C.

La ZNS de la estación A se compone de arenas finas limosas que mantienen su homogeneidad hasta el acuífero. Para este material se estimó por la función de pseudotransferencia (Schapp *et al.* 2001), un coeficiente α de 0,0234 equivalente con un valor de $h_a = -42,7$ cm. Al analizar la CRH para este material, la tensión matricial equivalente a h_a es correlativa con un contenido volumétrico de $0,34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Fig. 5a). La evolución del perfil de humedad para la sección estudio, refleja que el rango entre los $0,412 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0,34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ se aloja entre los 3,58 m y 4 m de profundidad, espesor de 42 cm que abarca la FC. La ZNS de la estación B por su parte se compone de un material franco limoso en su sección superior y de arena fina arcillosa por debajo de los 2 m de profundidad, siendo éste el nivel que se encuentra en contacto con el acuífero libre. Para este material, el valor de α estimado de 0,059 es equivalente a $h_a = -16,94$ cm. A partir de este valor, se logra determinar un espesor de FC de 18 cm sobre el nivel freático. El contenido volumétrico para esta zona se estima en el rango de $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a $0,39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, humedad de saturación (Fig. 5b). En ambos casos, la FC no tiene influencia sobre los niveles superficiales del suelo, existiendo espesores mayores al metro para el sector medio o intermedio de la ZNS.

En el caso de la estación C, se registra una situación muy diferente, donde los limos arcillosos que componen la ZNS promueven el ascenso de humedad desde el acuífero freático somero. Para este tipo de material, el valor de α estimado de 0,01 se corresponde a un valor de presión de entrada de aire de $h_a = -100$ cm. La curva de retención es típica de un limo arcilloso manifestando pendientes poco acusadas que indican una liberación lenta de la humedad a medida que aumenta la tensión del terreno. Una tensión matricial de -100 cm es correlacionable con un contenido volumétrico de $0,387 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Fig. 5c). Para el periodo simulado, la FC presenta espesores medios de 70 cm en condiciones estáticas y de hasta 110 cm durante periodos húmedos. En estos sectores, la FC mantiene una relación directa con la hidrodinámica, siendo la reguladora de los flujos hídricos verticales. Los niveles superiores del suelo están sujetos a contenidos volumétricos elevados durante todo el año y anegaciones superficiales durante periodos lluviosos.

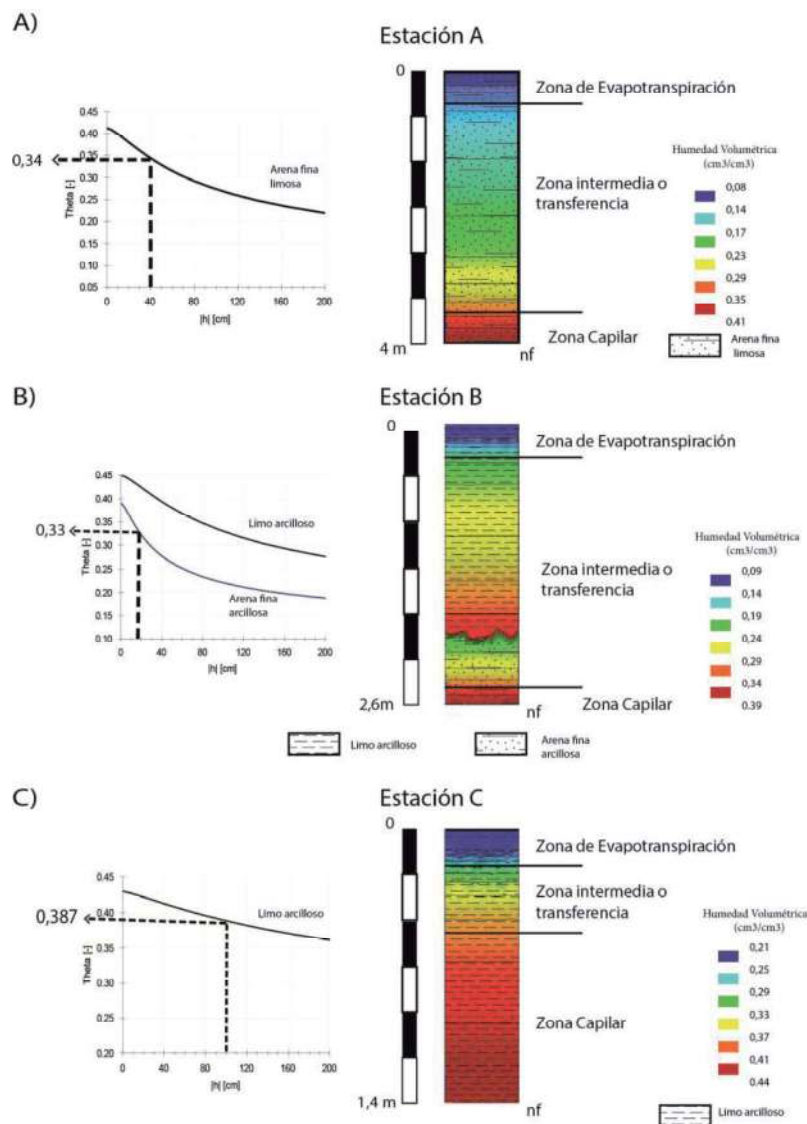


Figura 5: Evaluación de la franja capilar en cada estación relevada. Se observa la CRH de cada material y un perfil esquemático de los contenidos de humedad típicos para cada sector de la zona no saturada.

Será fundamental en el futuro, cuantificar el ascenso de solutos desde el acuífero libre hipersalino, promovido por el proceso de capilaridad, especialmente en estas zonas donde la FC ocupa la mayor parte del sistema no saturado. Actividades como estaciones de servicio y expendio de combustible, bajo estas condiciones, deberán ser controladas periódicamente, dado que ante la existencia de pérdidas de combustibles de los sistemas de almacenamiento subterráneo, el riesgo ambiental se agrava, pudiendo la FLNA migrar prácticamente en los 50 cm de profundidad del suelo.

CONCLUSIONES

La caracterización de la franja capilar cumple un rol fundamental en la planificación urbana. Este sector del sistema no saturado es capaz de ejercer influencia sobre los contenidos de humedad de los niveles superiores del suelo, afectando negativamente las construcciones en superficie o aumentando la peligrosidad ambiental ante la migración de potenciales contaminantes. De acuerdo a las simulaciones realizadas se descarta la influencia de la FC, dentro del sector Centro y Norte de la Ciudad de Bahía Blanca. En estos

sectores la FC mantiene espesores mínimos, atribuidos a la presencia de material arenoso en el subsuelo y espesores no saturados mayores a los 2 m, siendo escasa o nula la influencia de las variables atmosféricas.

En el sector Sudoeste de la localidad, por debajo de la cota 10 m.s.n.m. donde se desarrollan suelos de textura fina y un acuífero libre somero, se estimó un espesor de la FC de hasta 110 cm, en equilibrio con presiones matriciales de -100 cm. Los niveles superiores de la zona no saturada se encuentran influenciados por la posición del nivel freático. Será fundamental continuar con la evaluación de la transferencia de solutos al suelo por ascenso capilar desde el acuífero freático hipersalino.

REFERENCIAS

- Ajdary, K.**, 2008. Application of HYDRUS 2D for Simulation of Water Distribution in Different Types of Soils. International Meeting of Soil Fertility Land Management and Agrocimatology, Turkey, 253-261.
- Askri, B., Ahmed, A., Abichou, T. y Bouhlila, R.**, 2014. Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use. *Journal of Hydrology* 513 (2014): 81 - 90.
- Bonorino, A.G. y Sala J. M.**, 1983. Informe 2. Geohidrología. Comisión de estudios de suelo White-Cerri. M.O.P. de la provincia de Buenos Aires. La Plata (inédito).
- Chaar, E., Farinati, E., Aliotta, S. y Tassone A.**, 1992. Pleistoceno marino al sur de la ciudad de bahía blanca. Terceras jornadas geológicas bonaerenses. Actas, 59-62. La Plata, Argentina.
- FAO**, 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage: paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.
- Feddes, R. A., Kowalik P. J. y Zaradny, H.**, 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York, NY, 1978.
- Fidalgo, F., De Francesco, J. y Pascual, R.**, 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino (Bahía Blanca). Pág: 104-128. Buenos Aires.
- Fidalgo, F.**, 1983. Geología y geomorfología del área de white-cerri y los alrededores de bahía blanca. Comisión estudio de suelos White-Cerri. M.O.P de la provincia de Buenos Aires. La Plata (Inédito).
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A.**, 1979, Groundwater. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.
- Kandelous, M.M. y Simunek. J.**, 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS 2D. *Agricultural Water Management*, 97: 1070-1076.
- Lexow, C.**, 2010. Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código HYDRUS 2D/3D en la modelación del flujo no saturado. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras (Eds. M. Varni, I. Extraigas, L. Vives). Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usnoff (1): 279-286. ISBN 978-987-543-392-2.
- Lexow, C., Pera Vallejos, G. y Bauer, E.**, 2017. Comportamiento de la franja capilar en el sector oeste de la ciudad de bahía blanca. XX Congreso Geológico Argentino, San miguel de Tucumán. Sección técnica 15, pág.: 65-66.
- Mualem, Y.**, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3):513-522.
- Municipalidad de Bahía Blanca**, 2016. Subsecretaría de Gestión Ambiental, Área de Auditoría, Registros Ordenanza Municipal 10787.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. y Van Genuchten, M.Th.**, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 163-176, 2001.
- Schenger, L.** 2017. Aplicación del código Hydrus 2D/3D para el estudio de la hidrodinámica de la ZNS, en el ámbito industrial de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Prov. de Bs. As. Quilmes: 2017.
- Simunek, J., Sejna, M. y Van Genuchten, M. Th.**, 2006. The HYDRUS (2D/3D) software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Van Genuchten, M. Th.**, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44(3):892-898.