

LA IMPORTANCIA DE LA ZONA NO-SATURADA EN LA HIDROLOGÍA DE LLANURAS

Mario A. Hernández

Cátedra de Hidrogeología, CISAUA, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata y CONICET. Calle 3 N° 584, (1900) La Plata. E-mail: mario_h@sinectis.com.ar

Resumen

Se realiza un análisis de la importancia que posee la Zona No-Saturada en el conocimiento de los fenómenos hidrológicos en llanuras, por radicarse en ese ámbito los más significativos en la fase terrestre del ciclo hidrológico (evapotranspiración e infiltración). Luego de su caracterización desde los puntos de vista físico, hidrodinámico, hidroquímico y biológico, se hace una revisión crítica de las herramientas metodológicas más utilizadas en la investigación hidrológica de la ZNS. Finalmente, se plantea el rol ambiental de esta zona en las regiones llanas, tanto desde su participación en la atenuación de procesos contaminantes, como de su incidencia en procesos de anegamientos importantes y persistentes.

Palabras clave: Geohidrología, Zona No-Saturada, Llanuras.

Abstract

The significance of the non-saturated zone (NSZ) for the knowledge of hydrological phenomena in flatlands is analyzed, since it includes the most important phenomena in the terrestrial phase of the hydrologic cycle (evapotranspiration and infiltration). The physical, hydrodynamical, hydrochemical and biological aspects of the NSZ are characterized. A critical review is made on the methodological tools more frequently used in the hydrological investigation of the NSZ. Finally, the environmental role of the NSZ in flatlands is exposed, both in the attenuation of polluting processes and in the influence on important and prolonged floods.

Key words: Geohydrology, Unsaturated Zone, Flatlands.

Introducción

La zona no-saturada (ZNS), aquel espacio físico comprendido entre la superficie topográfica y la correspondiente al primer ni-

vel de agua subterránea (nivel freático), es el nexu cuasi universal entre los arcos terrestre superficial y terrestre subterráneo del ciclo hidrológico.

También denominada zona de aireación o zona vadosa, su conocimiento cuantitativo data de comienzos del siglo XX con Buckingham (1907), pero es a partir de 1969 cuando se lleva a cabo el Simposio de

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Armando Ballofett" en Hidrología, el 10 de noviembre de 2000.

UNESCO en Wageningen [10] en que toma un notable desarrollo, sucediéndose rápidos avances en los campos teórico y experimental, conjuntamente con la aparición de nuevas herramientas metodológicas.

A las contribuciones originales de hidrólogos superficiales, geohidrólogos y edafólogos, concurren en el tiempo las provenientes de los campos de la física del suelo, agrohidrología, fisiología vegetal, física de los gases, hidroquímica, geología e hidrología isotópicas, modelación numérica y otras disciplinas.

Este rezago en la investigación hidrológica de la ZNS respecto a otros campos del conocimiento del ciclo hidrológico, pese a ser el elemento más próximo a la superficie de aquellos que conforman el arco subterráneo, halla su explicación en el carácter sumamente complejo de su dinámica, por tratarse de un sistema multifásico conformado por las fases sólida (partículas o clastos del terreno), líquida (agua) y gaseosa (aire y vapor de agua). Incluso en la fase sólida, además de la componente inorgánica mencionada, se halla la orgánica constituida por la masa radicular en la sub-zona del suelo.

A diferencia de lo que ocurre en la zona saturada, donde el flujo de agua en los medios porosos está regido por la ley de Darcy, en la ZNS intervienen también la ley de la gravedad, las leyes de los gases y de la difusividad, además de actuar fuerzas como la higroscópica, tensión superficial y otros fenómenos de superficie (absorción y adsorción). Ocurren también fenómenos como el de histéresis, que complican aún más el panorama analítico [3].

La natural importancia de la ZNS en el fenómeno hidrológico está maximizada en las regiones llanas, por predominar en éstas los movimientos según vectores verticales por sobre los sub-horizontales. Y es precisamente la ZNS escenario de los dos más importantes: la infiltración y la evapotranspiración.

Se analizan sucesivamente las características físicas, hidrodinámicas, hidroquímicas y biológicas de la ZNS, las herramientas metodológicas actuales para su conocimiento y la implicancia de los fenómenos actuantes en las grandes llanuras, especialmente desde

una visión ambiental.

Características físicas de la ZNS

Desde el punto de vista físico, se reconocen en la zona no-saturada tres subzonas en orden descendente: la superior o zona del suelo, la intermedia y la inferior o capilar.

La *subzona superior* se extiende desde la superficie del terreno hasta el horizonte C del suelo o los extremos radicales de la vegetación mesófito. Su conformación depende naturalmente del tipo de suelo, especialmente de sus propiedades físicas (granometría, textura, densidad aparente, etc.), entre extremos de suelos profundos y bien desarrollados a someros y de perfiles reducidos, o de materiales gruesos muy permeables, a pelíticos con valores elevados de retención específica.

La *subzona intermedia* responde físicamente a las características del material parental de los suelos, al menos en su parte cuspidal, siendo las variables de más importancia la isotropía o anisotropía del medio físico y el desarrollo vertical, mayor en regiones bajo clima árido que en las de régimen húmedo. La anisotropía local produce fenómenos más adelante descriptos, como la ocurrencia de aguas "colgadas" cuando una lente de menor permeabilidad soporta parte del agua grávida. No está afectada por las raíces vegetales y por ello su compacidad es mayor.

La *subzona inferior* está constituida por el agua capilar continua o franja capilar, suprayacente al nivel freático (zona saturada) del cual se alimenta. Además de las propiedades fisicoquímicas del agua (temperatura, densidad, viscosidad, salinidad), la variable primordial es el tamaño poral, porque su desarrollo vertical depende inversamente de éste. El límite superior puede ser bien definido o apenas perceptible, de acuerdo a las propiedades del terreno.

Puede anticiparse que estas características físicas de la ZNS van a ser determinantes de las hidrodinámicas o hidroquímicas, ya que por ejemplo, la capacidad de retención del suelo de acuerdo a su textura va a comandar el ritmo de infiltración del agua grávida, como los tamaños porales lo hacen

Cuadro I. Tipos de agua en la ZNS.

Tipo de agua	Subzona	Vector	Fuerza actuante
Vapor de agua	Superior	Ascendente	Vaporización
Retenida	Superior	No	Tensión superficial
Higroscópica	Intermedia	No	Higroscópica
Pelicular	Intermedia	No	Adsorción
Grávica	Interm./Inferior	Descendente	Gravedad
Capilar discontinua	Intermedia	Ascendente	Tensión superficial
Capilar continua	Inferior	Ascendente	Tensión superficial
Agua colgada	Intermedia	No	
Agua congelada	Superior	No	Congelación

respecto al desarrollo de la subzona capilar, al extremo de su ausencia cuando resultan supercapilares.

Características hidrodinámicas de la ZNS

La Zona No-Saturada incluye diferentes tipos de agua, tanto por su estado, dinámica o régimen.

Desde el punto de vista del *estado* puede hallarse como líquido, como vapor y dependiendo del clima, como sólido.

En cuanto a su *dinámica*, existen aquellas prácticamente fijas como el agua *higroscópica* fuertemente adherida a la superficie de las partículas sólidas por una de las fuerzas de mayor valor en la naturaleza, y el agua *pelicular*, que rodea a la anterior sostenida por fuerzas de adsorción. También hay aguas transitoriamente retenidas, como el *agua del suelo* hasta que se alcanza el límite de retención conocido como capacidad del campo, superado el cual se desencadena un movimiento vertical descendente: *agua grávica* que va a originar el fenómeno de infiltración.

Otro tipo es el *agua capilar* en aquellos espacios porales de tamaño capilar o subcapilar, sostenida por el fenómeno de tensión superficial, en forma *discontinua* en la zona intermedia o en forma continua como una *franja capilar*, yacente sobre el acuífero

freático que le sirve de fuente..

Cuando se halla al estado gaseoso, como *vapor de agua*, reconoce en la subzona del suelo un movimiento ascendente en especial en las regiones de clima cálido.

Pueden encontrarse también en la ZNS aguas ocasionales, presentes únicamente bajo ciertas condiciones: el *agua colgada*, soportada por lentes de menor permeabilidad merced a condiciones físicas anisotrópicas, o el *agua congelada*, en climas rigurosamente fríos, generalmente como *permafrost* o suelos congelados.

En el Cuadro I se resumen las características dinámicas principales del agua en la ZNS.

Mientras que en la Zona Saturada el flujo del agua en medios porosos esta regido por la Ley de Darcy:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta h / l \quad (1), \text{ donde:}$$

Q (m³/d): Caudal que atraviesa una sección **A** (m²).

K (m/d): Coeficiente de Permeabilidad o Conductividad hidráulica.

Δh (m): Diferencia de altura hidrostática en una distancia **l** (m).

Δh/l: Gradiente hidráulico (**i**).

En la zona no saturada intervienen componentes más complejas, producto del ca-

rácter multifásico del flujo, la presencia de tensiones capilares y fuerzas de adhesión y la ocurrencia del fenómeno de histéresis.

En 1909 Buckingham [3] plantea ya una expresión de esta ley para medios no saturados como:

$$q = -k \text{ grad } \varphi \quad (2)$$

siendo q el caudal que fluye por unidad de sección, k la permeabilidad del medio no-saturado, función del contenido de humedad (w) y el $\text{grad } \varphi$ (gradiente de potencial) homólogo al valor i .

Si bien k es planteado como función de w , esta relación no es lineal ya que el valor numérico de k disminuye rápidamente al disminuir el contenido de humedad, tanto por el vaciamiento inicial de los espacios porales mayores en estado de deshumectación, como por el rozamiento del agua con el aire, el efecto retardador de la adhesión y la influencia de fuerzas electrosmóticas y electrocapilares, de vector opuesto al movimiento del agua.

Tanto el contenido de agua como la permeabilidad k pueden expresarse a su vez en función de otras variables de la ZNS como la tensión matricial Ψ o succión (presión intraporal negativa que se opone al ascenso capilar), de tal forma que la Ley de Buckingham-Darcy [10] puede expresarse de la forma:

$$q = k \cdot \text{grad } \Psi - k \cdot i_z \quad (3) \text{ o}$$

$$q = w \cdot \text{grad } \Psi - w \cdot i_z \quad (4)$$

En la Figura 1 se puede comprobar la marcha de los valores de Ψ respecto a w , según la ZNS esté en proceso de humectación o deshumectación. Idéntico comportamiento se tendría de comparar las variables k y w , reflejándose el significado físico del fenómeno de histéresis, cuya ocurrencia complica el análisis dinámico en la ZNS, desde el momento en que los valores parametrales de la Ley de Darcy (permeabilidad) se comportan como variables.

A fin de minimizar el efecto de histéresis, algunos autores [1] [12] [8] acuden a utilizar un coeficiente llamado de Difusividad

capilar (D),

$$D = -k \cdot \delta\Psi / \delta w \quad (5)$$

de dimensiones m^2/d o cm^2/seg , análogo en su forma al coeficiente de difusión de la Ley de Fick [3], que aplicado a la Ley de Buckingham-Darcy permite expresarla como:

$$q = -D \text{ grad } w - k \cdot i_z \quad (6)$$

Se ha demostrado que D en función de w muestra solamente un muy pequeño efecto de histéresis [3] [8], cosa que no ocurre como se ha visto con $\Psi f(w)$, $k f(w)$ y aún con $D f(\Psi)$.

Estos razonamientos son elementales para entender los problemas hidrodinámicos en la ZNS. Existen algoritmos mucho más complejos de manejar como los de Richards, Klute, Leverett, Buckingham-Reiner, Philip, Van Genuchten y otros [11], pero que no logran minimizar el efecto de histéresis como la aplicación del coeficiente D . También la consideración del flujo en fase vapor va a introducir un mayor grado de complejidad al problema [3] [10] [12].

Al tratar más adelante el ítem de las herramientas metodológicas, se hará alusión a las prácticas más habituales para tratar de dilucidar el flujo en medio no-saturado.

Desde la física de suelos se manejan dos conceptos fundamentales que hacen al fenómeno de infiltración, desde el momento que su ocurrencia en la ZNS va a posibilitar la recarga en la Zona Saturada (ZS). Son los de Capacidad de campo (Cc) y Punto de Marchitez Permanente (PMP), ambos representativos de contenidos de humedad críticos en la sub-zona superior de la ZNS (sub-zona del suelo). No obstante, son parámetros dinámicos y si bien se los consigna cuantitativamente, en realidad representan sendas franjas o intervalos de valores que dependen además del tipo de suelo y su textura, de variables como la temperatura, profundidad radicular y poder evaporante de la atmósfera, entre otros [4].

La Capacidad de campo puede definirse como la cantidad de agua contenida en un suelo que se almacena y es retenida con-

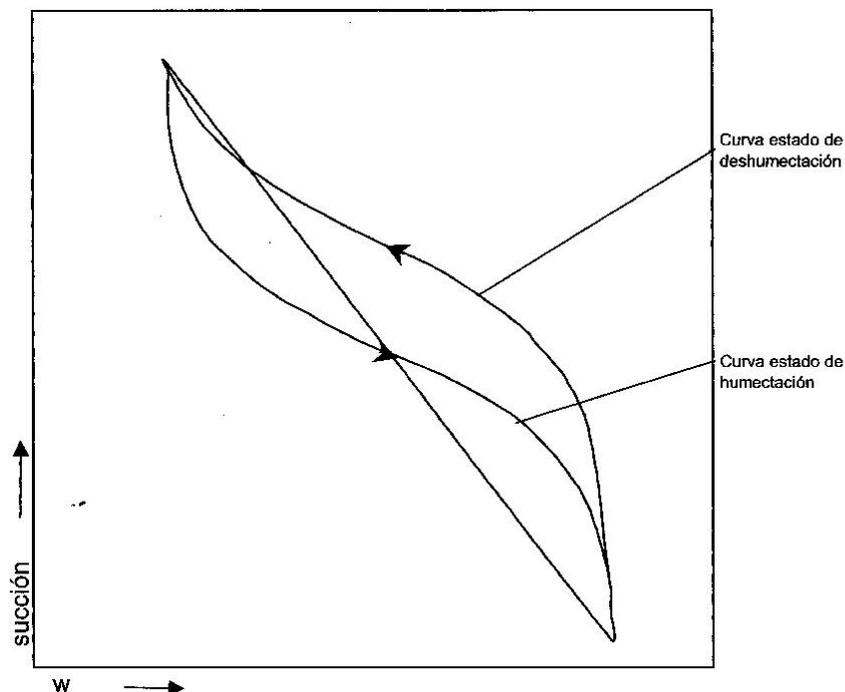


Fig. 1. Curva de histéresis.

tra la fuerza de la gravedad. En general está en un rango de 1/3 de bar de la tensión matricial o tensión de succión, aunque en suelos muy arenosos puede alcanzar 1/10 de bar. El Punto de Marchitez Permanente es aquel contenido de humedad bajo el cual las plantas exhiben síntomas de marchitamiento que no es reversible aún cuando se las someta a una atmósfera saturada de humedad. Corresponde en general a un valor de 15 bar de la tensión matricial [4].

Retomando la síntesis mostrada en el Cuadro I, el coeficiente Cc estaría marcando el límite entre el agua retenida en el suelo (a disposición de las plantas y por ende, del fenómeno de evapotranspiración) y el agua grávida.

Dicho de otra manera, una vez superado el contenido de humedad correspondiente a Cc ocurre el fenómeno de infiltración potencial. Por debajo de Cc y hasta el valor PMP, se trata de agua disponible para su transferencia a la atmósfera a través de las plantas

(evapotranspiración). Por debajo del valor PMP en cambio, se está en el campo del agua fija, sostenida a las partículas del suelo por fuerzas de superficie superiores a los 15 bar.

Características hidroquímicas y biológicas de la ZNS

A diferencia de lo que ocurre en la Zona Saturada, la presencia de la fase gaseosa (Oxígeno, CO₂, vapor de agua) en la ZNS va a condicionar fuertemente los fenómenos hidroquímicos que se suceden, al igual que la existencia de fenómenos de sorción e intercambio de bases.

El principal efecto químico de la presencia de Oxígeno es la ocurrencia del fenómeno de oxidación y consecuente precipitación y coprecipitación de metales pesados, siguiendo el paradigma de la oxidación del Fe⁺⁺ a Fe⁺⁺⁺ o Mn⁺⁺ a Mn⁺⁺⁺. Entre los metales reconocidamente contaminantes que pueden coprecipitar se hallan Cd, Cr, Cu, Sn, Hg, Zn,

Pb, W, bajo un Eh medio o elevado [5].

También la presencia de Oxígeno favorece de cierta manera la complejación de compuestos orgánicos, tales como los hidrocarburos (especialmente los aromáticos y alifáticos), produciendo en consecuencia una atenuación de la carga contaminante, aunque de muy difícil predicción [2] [5].

Otros procesos hidroquímicos actuantes en la ZNS son los fenómenos de superficie o sorción, que como se viera desde el punto de vista físico, colaboran en la retención de compuestos inorgánicos y orgánicos, dependiendo de factores como el tiempo de residencia y tránsito del fluido portador y en ciertos casos del clima, amén del factor textural.

El intercambio iónico se produce entre el agua en tránsito en la ZNS y el agua pelicular que rodea a la higroscópica y a la partícula sólida, posibilitando que algunos iones (especialmente cationes) de características contaminantes queden fijados al film a cambio de otro, generalmente Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} o H^+ .

El proceso de hidrólisis es favorecido en el caso de los carbonatos y silicatos por la presencia de CO_2 , cuya máxima expresión está radicada en la ZNS y en especial en la subzona del suelo. En cambio este gas retarda o entorpece la hidrólisis de sales amoniacales e hidróxidos de hierro.

Este ámbito particular cual es la ZNS para la ocurrencia de fenómenos hidrogeoquímicos, puede ser también destacable desde el punto de vista microbiológico.

La presencia de Oxígeno favorece la microvida aerobia capaz de degradar o digerir gran parte de los contaminantes biogénicos, efecto que prácticamente desaparece no bien se ingresa a la zona saturada, donde el medio es anaerobio.

Este efecto favorable no es lineal, ya que existen formas aerobias de carácter tóxico o perjudicial.

También bacterias aerobias (*Crenothrix sp.*, *Gallionella sp.*) coadyuvan a la fijación del Fe^{++} como $(\text{OH})_3\text{Fe}$.

Herramientas metodológicas

Acceder al conocimiento detallado de

los procesos ocurrentes en la ZNS es sumamente dificultoso, desde el momento en que se trata de un sistema multifásico donde actúan fenómenos diferentes, se cumplen leyes físicas distintas y los factores hidrodinámicos e hidroquímicos son de compleja medición y comprensión.

Un elemento de análisis básico es la resolución del *balance hídrico*, que va a aportar una idea elemental acerca de los volúmenes de agua en juego, ya sea los atinentes a la reposición de *agua almacenada en el suelo* o, una vez superada la capacidad de campo, los que van a conformar el *agua grávida* como parte del fenómeno de *infiltración*.

Los balances hídricos parten en general del cotejo entre los aportes atmosféricos y las pérdidas consuntivas (*evapotranspiración real Evtr*), para determinar *excesos* infiltrables, *tasas de reposición de agua* y *déficit hídrico*. Pueden materializárselos mediante métodos de base física, fundados en el balance de energía (método aerodinámico global, perfiles de humedad y viento, etc.) para el cálculo de la evapotranspiración, fórmulas empíricas o semiempíricas con el mismo objetivo, o métodos químicos (balance de cloruros en aguas de lluvia y aguas subterráneas).

En comarcas extensas, donde no es usual contar con datos micrometeorológicos para satisfacer los métodos de base física, se utilizan para aproximar el valor de *Evtr* los semiempíricos (fórmulas de Penmann, Blaney & Criddle) o empíricos (fórmulas de Coutagne, Turc, Thornthwaite).

Particularmente útil para climas medios es la aplicación del método de Thornthwaite-Mather, basado en la transformación de la evapotranspiración potencial calculada por la fórmula original del primero de los autores en evapotranspiración real, por medio precisamente del balance hídrico. El producto es la cuantificación de los excesos y déficit anuales y mensuales, estos últimos para obtener una idea de la distribución intranual. Como una variante del método original, últimamente se lo emplea en la modalidad seriada con paso mensual o diario [6] [9] como elemento base para el análisis de la dinámica en la ZNS.

Este último punto resulta de muy di-

ficil resolución, por la ya mencionada existencia del fenómeno de histéresis, lo cual obliga a un seguimiento experimental de las variables intervinientes. Para satisfacer las fórmulas ya comentadas más arriba, es necesaria la medición periódica de la *tensión matricial*, utilizando tensiómetros de campo a distintas profundidades, para reconstruir su distribución vertical. Para la obtención del perfil dinámico del *contenido de humedad* en la ZNS existen varios métodos como el de electroregistro o el perfil con sonda de neutrones [8].

Este perfilaje se basa en la emisión de neutrones rápidos por una fuente radiactiva, que al impactar con núcleos de Hidrógeno se termalizan (pierden velocidad). Como la mayor parte de los núcleos de Hidrógeno se hallan en la molécula de agua, el conteo de los neutrones termalizados es proporcional al contenido de humedad [13]. El registro a diferentes profundidades permite, en conocimiento de la densidad aparente del suelo, construir el perfil dinámico de humedad.

La *permeabilidad* en la zona no saturada es otra variable cuya determinación no resulta sencilla [15]. Los métodos utilizados son de campo, pudiendo mencionarse el de Hillel, consistente en una parcela experimental en la cual se simula el aporte pluvial (simulador de lluvias), cubriéndose la superficie con membrana impermeable para sustraerla al efecto atmosférico; se mide la respuesta en freátímetros contruidos al efecto, calculándose el valor de k mediante las fórmulas propuestas por el autor, derivadas de la Ley de Darcy.

Más operativos resultan los métodos basados en dispositivos conocidos como torres de succión o discos de succión, que permiten la aplicación de la fórmula de Wooding [14] [16]. Se trata de un instrumental portable, consistente en una superficie microporosa vinculada a un par de columnas de agua interconectadas, una de las cuales no está sometida a la presión atmosférica. Se miden los descensos en función del tiempo, lográndose los insumos necesarios, junto con las dimensiones normalizadas del equipo, para satisfacer la fórmula que permite también estimar el *Índice de Absorbilidad*.

Para la determinación de las propiedades hidrofísicas C_c y PMP como contenidos de humedad característicos, según se analizara, se utiliza con preferencia la Membrana de Richards, equipo de presión en la cual se somete a las muestras previamente preparadas, a las presiones de trabajo críticas correspondientes a cada uno de los parámetros (0.1 - 0.5 bar y 15 bar).

Un importante auxiliar del análisis de los fenómenos ocurientes en la ZNS es la aplicación de técnicas isotópicas, tanto de isótopos estables o ambientales como radionucleidos. El seguimiento de las relaciones isotópicas ^2H (Deuterio)/ ^{18}O en aguas de lluvia y en la ZNS permite dilucidar el flujo vertical de agua (infiltración) en relación al volumen total del aporte vertical neto. Por otra parte, otro isótopo (radiactivo) del Hidrógeno, el ^3H (Tritio), posibilita a través de la determinación de la edad del agua de la ZNS estimar variables de interés, como la velocidad de infiltración o el tiempo de residencia.

Respecto a la velocidad de infiltración, existen métodos clásicos de campo bastante aproximativos, basados en la estimación de la infiltración básica. Se utilizan dispositivos normalizados de anillo (Kamenskii) o de doble anillo (Nesterov) colocados sobre el terreno, con carga constante de agua, midiéndose con frecuencia logarítmica el volumen de agua de reposición. Se obtienen velocidades puntuales para cada tiempo, graficándose las velocidades (y) contra los tiempos (x) hasta que la curva se hace asintótica a este último eje, valor de la infiltración básica equivalente a la velocidad de infiltración (método de Kostiaikov). También puede utilizarse el instrumental descrito para el cálculo de la Permeabilidad (torres de succión o discos de succión).

Una metodología recientemente probada [7], aplicable cuando se dispone de mediciones diarias o intradiarias del nivel freático, es su correlación con los aportes netos surgidos del balance hídrico de paso diario, en conocimiento del perfil del suelo para poder estimar la distancia desde el horizonte retentivo más profundo hasta la superficie freática.

Para los análisis químicos convencio-

nales, de metales pesados, plaguicidas, hidrocarburos livianos y otros componentes orgánicos, la toma de muestras del agua en la ZNS se realiza generalmente utilizando cápsulas de succión. Son columnas de polietileno, con una cápsula porosa en su extremo inferior (porcelana, teflón, acero microporoso), que se instala en el subsuelo sometida a vacío de tal forma que el agua pueda ingresar, para ser retirada periódicamente mediante una bomba de vacío portátil o jeringa. Existe una variedad de dispositivos similares, aunque cuando se trata de profundidades no muy grandes, pueden utilizarse simplemente las muestras sólidas húmedas recuperadas por barrenos o muestreador, para obtener el fluido en centrífuga [2].

Finalmente, una herramienta de gran utilidad en la actualidad es la aplicación de la modelación en el análisis hidrodinámico, hidroquímico o del transporte de solutos a través de la ZNS.

Se ha desarrollado una gran cantidad de modelos matemáticos para reproducir la fenomenología ocurrente en la ZNS, que van desde los más simples bidimensionales bajo régimen uniforme, a los más complejos, en régimen variable y para condiciones anisotrópicas.

La mayor parte de ellos se basa en los algoritmos más arriba citados, existiendo una amplia oferta de software desarrollados y experimentales, con distinta complejidad y cantidad de variables y parámetros intervinientes. También se dispone de modelos de transporte de solutos en la ZNS, en general compatibles con los modelos hidrodinámicos que le sirven de base.

El rol ambiental de la ZNS en las llanuras

Como se anticipara al comienzo de este artículo, la ZNS adquiere un rol fundamental en las regiones llanas por alojar a los dos fenómenos preponderantes en el ciclo hidrológico regional: la infiltración y la evapotranspiración.

Pero un aspecto destacable en las llanuras lo constituye la incidencia ambiental de la ZNS, sus características, su dinámica y

la ocurrencia de los fenómenos hidroquímicos y biológicos ya descriptos, en función del rol mencionado.

Es importante resaltar en primer lugar el carácter de "escudo protector" que posee la ZNS, en lo referido a la oportunidad de degradación o atenuación natural de la contaminación que ocurre en o desde la superficie del terreno y se dirige a los acuíferos. Este rol es análogo al que en la naturaleza juega la capa de Ozono respecto a las radiaciones ultravioleta.

Son pocas las chances para que las sustancias contaminantes puedan ser degradadas o atenuada su toxicidad en el dominio subterráneo. La ZNS constituye la mayor oportunidad, ya que al ingresar el agua a la zona saturada, solamente la dilución y el tránsito vertical a través de medios semipermeables pueden ofrecer cierta capacidad atenuadora.

La infiltración es obviamente el vector de las sustancias contaminantes hacia los acuíferos. Por tratarse la ZNS de un sistema multifase, la presencia del Oxígeno en la fase gaseosa posibilita que los solutos metálicos puedan ser oxidados y precipitados-coprecipitados, como se ha descripto. También los compuestos orgánicos pueden complejarse a formas menos tóxicas por la intervención del Oxígeno, los fenómenos de sorción adquieren una dimensión importante al igual que los de volatilización en la sub-zona del suelo [5].

Estos fenómenos fisicoquímicos tienen su correlato con los biológicos y bioquímicos, asociados los primeros a la ocasión de que la microvida aerobia actúe a favor de la digestión de los componentes biotóxicos en tránsito y los segundos, a la transformación bioquímica facilitada por la presencia de CO₂, cuya máxima concentración y presión disminuye desde la sub-zona del suelo en profundidad, hasta minimizarse ya en la zona saturada.

Surge aquí una relación casi lineal entre el espesor de la ZNS y la posibilidad de ocurrencia de los fenómenos atenuadores mencionados. Por tal razón, en los climas áridos o semiáridos cobra mayor relevancia el efecto protector de la ZNS respecto a los regímenes húmedos, por la mayor profundidad de la superficie freática y por ende, mayor desa-

rollo de la ZNS. Es por lo tanto mucho más vulnerable a diferentes tipos de contaminación el agua subterránea en comarcas húmedas e hiperhúmedas.

Una de las intervenciones antrópicas de mayor riesgo en las llanuras, está asociada precisamente a la remoción de la ZNS con fines de utilización de los materiales para fabricación de ladrillos, extracción de áridos y/o calcáreos para la construcción o vialidad, de la franja del suelo para jardinería o simplemente para préstamos de relleno. Esta acción está eliminando las oportunidades de atenuación natural, lo cual de por sí es un factor ambientalmente negativo. Pero si se asocia a estas prácticas el muy frecuente uso de las "cavas" para alojar residuos de todo tipo (vertederos espontáneos o no controlados), los resultados suelen ser realmente muy peligrosos.

Existen otros fenómenos ocurrentes a expensas de la dinámica de la ZNS que no son directamente contaminantes. Uno muy frecuente en las llanuras húmedas, es el de la denominada "recarga rechazada" de directa implicancia en episodios de anegamientos e inundaciones, por ejemplo en vastos sectores de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba.

La recarga rechazada ocurre cuando por significativos y persistentes excedentes hídricos, la superficie freática y la franja capilar adosada ascienden reduciendo progresivamente la capacidad de almacenaje subterráneo de agua, al extremo de llegar a la superficie topográfica. Desde ese momento, todo nuevo aporte exógeno no tiene espacio disponible en el subsuelo y derrama en superficie originando o extendiendo los anegamientos.

El nombre "recarga rechazada" alude a que si bien las propiedades del medio físico pueden ser aptas para que se produzca la infiltración, los espacios porales ya están colmados y todo aporte potencial será en consecuencia rechazado, no ingresando al dominio subterráneo.

Hasta no hace muchos años, no era reconocida la participación de la ZNS en los vastos anegamientos que se sucedieron en la llanura pampeana húmeda a semiárida a partir de la década de los '80, hecho admitido sin

reservas en la actualidad.

Si bien los anegamientos prolongados implican de por sí una calamidad ambiental, en los ámbitos rurales o suburbanos donde no existe colección ordenada de las excretas domiciliarias, se produce además un contacto indeseado de los residuos biogénicos con la superficie a expensas de la práctica del saneamiento "in situ", con las consiguientes secuelas sanitarias.

Conclusiones

Por predominar en el ciclo hidrológico de las regiones llanas los movimientos de vector vertical por sobre los sub-horizontales, la Zona No-Saturada se constituye en el elemento fundamental por albergar a los dos principales factores: la evapotranspiración y la infiltración.

El conocimiento cuantitativo de los fenómenos hidrológicos en la ZNS resulta muy complicado, por tratarse de un sistema multifásico, donde los procesos ocurrentes obedecen a distintas leyes físicas de difícil compatibilización. En este escenario, el fenómeno de histéresis se erige en el principal escollo para esa investigación.

Ocurren en la ZNS las manifestaciones más relevantes de atenuación natural de la contaminación en el medio subterráneo. Desde el punto de vista fisicoquímico, la precipitación-coprecipitación de metales, complejación de sustancias orgánicas, sorción e intercambio iónico. Desde el biológico, la actividad microbiana en medio aerobio y la capacidad transformadora del CO₂ contenido en la sub-zona del suelo.

Cuando el agua exógena llega a la zona saturada, los procesos de oxidación y aeróbicos son reemplazados por los de reducción y anaeróbicos, de escasa o nula capacidad para atenuar la toxicidad de los solutos que ingresan a los acuíferos.

Las llanuras bajo régimen árido o semiárido ofrecen las mayores posibilidades de retardación o atenuación de la contaminación en tránsito, debido al mayor desarrollo de la ZNS (mayor profundidad de la superficie freática). Inversamente, las sometidas a un clima húmedo o hiperhúmedo resultan más

vulnerables.

También la ZNS tiene decisiva participación en la ocurrencia de vastos e importantes anegamientos en las llanuras, al producirse el fenómeno de recarga rechazada por la reducción de su potencia o sencillamente, de su desaparición por afloramiento de la superficie freática o al menos, de la franja capilar.

La intervención antrópica en la extracción de materiales del subsuelo próximo (cavas resultantes de las actividades mineras o constructivas) potencia los procesos contaminantes, al reducir o eliminar la ZNS y por ende, la capacidad natural de reducir o atenuar la contaminación de las aguas subterráneas.

Referencias

- [1] Bear J. (1972) "Dynamics of fluids in porous media". *Elsevier*, 764 pp.
- [2] Candela Lledó L. (1997) "El transporte de contaminantes por la zona no saturada" *III Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea, Actas:17-30*. Bahía Blanca.
- [3] Custodio E. & M. R. Llamas (1983) "Hidrología Subterránea". *Ed. Omega* (2ª Ed.). Barcelona.
- [4] Chambouleyron J.L. (1980) "Riego y Drenaje". *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2ª Ed. Fasc. 4-3-2. Ed. ACME*. Buenos Aires.
- [5] Foster S. & R. Hirata (1988) "Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas" *CEPIS OPS-OMS*. Lima.
- [6] González N., M.A. Hernández & V.A. Ruíz de Galarreta (1997) "Balance Hidrológico a nivel de la zona no-saturada en un área de la cuenca de los arroyos Martín y Carnaval. La Plata, Provincia de Buenos Aires. Argentina" *III Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea, Actas:97-106*. Bahía Blanca.
- [7] González N., M.M. Trovatto & M.A. Hernández (2001) "La Zona No-Saturada en áreas de Llanura. Estimación de la velocidad de infiltración por correlación diaria aportes-freatigrafía" *IGME, I: 249-254*. (ISSN 0366-0178). Madrid.
- [8] Hernández M.A., V.A. Ruíz de Galarreta & A. Aragón (1988) "Dinámica capilar de la zona no-saturada en un área piloto de la cuenca superior del Arroyo Tandileofú (Partido de Tandil)". *II Jorn. Geol. Bonaerenses, CIC*, pp. 537-548. Bahía Blanca.
- [9] Hernández M.A., N. González & M.M. Trovatto (2001) "La Zona No-Saturada en áreas de Llanura. Estimación de la evapotranspiración real por medio del Balance Hidrológico en la ZNS". *IGME, I: 241-247*. (ISSN 0366-0178). Madrid.
- [10] IASH/AIHS (1969) "Water in the unsaturated zone". *Proceedings of the Wageningen Symposium. UNESCO* (Vol. I,II).
- [11] Kirkland M.R., R.G. Hills & P. J. Wierenga (1992) "Algorithms for solving the Richard's equation for variably saturated soils". *Water Resour. Research*, 28:2049-2058.
- [12] Peck A.J. (1969) "Diffusivity determination by a new outflow method". In "Water in the unsaturated zone". *Proceedings of the Wageningen Symposium. UNESCO* I:191-202. Wageningen.
- [13] Ruíz de Galarreta V.A., M.A. Hernández & N. González (1997) "Hidrodinámica de la zona no-saturada en el Parque Ecológico Municipal La Plata. Provincia de Buenos Aires. Argentina. *III Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea, Actas:49-60*. Bahía Blanca.
- [14] Simunek J. & M.T. Van Genuchten (1996) "Estimating unsaturated soils hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion". *Water Resour. Research*, 32:2683-2696.
- [15] Van Genuchten M.T. (1980) "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils" *Soil Sci. Soc. Amer. Journal*, 44:892-898.
- [16] Vauclin M. (1994) "Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol". *Rev. des sciences de l'eau*, 7:81-102. Grenoble.

Manuscrito recibido y aceptado en abril de 2002.