

ESTUDIO SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA ZONA NO SATURADA EN LAS INMEDIACIONES DE DISPOSITIVOS DE TIPO SUPERFICIAL DE GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS. LAS ESTACIONES DINA-MAR ZNS. PRIMER CICLO DE OPERATIVIDAD.

A. Enrique Fernández Escalante^{1*}, Ana García Merino²

1: Tragsa I+D+i
C/ Julián Camarillo 6b, 28.037, Madrid.
e-mail: efernán6@tragsa.es, web: <http://www.dina-mar.es>

2: Tragsatec. Área de Planificación y Gestión Hídrica.
C/ Julián Camarillo 6a, 28.037, Madrid.
e-mail: agm@tragsatec.es, web: <http://www.dina-mar.es>

Palabras clave: MAR, Gestión de la recarga de acuíferos, recarga artificial, Zona no Saturada, DINA-MAR.

RESUMEN. *En el marco del proyecto de I+D+i DINA-MAR, que investiga las zonas más susceptibles para la gestión de la recarga de acuíferos en España y criterios para el diseño de dispositivos idóneos, se han construido dos estaciones de toma de datos en las inmediaciones de un canal de recarga artificial. Este artículo presenta los objetivos del proyecto, la metodología prevista, la descripción de las estaciones, los datos y la primera interpretación tras un año de operatividad. Esta ha servido para mejorar las técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT) aplicadas para incrementar la tasa de infiltración desde los canales, reducir la resistencia a la infiltración que provoca el aire atrapado en el acuífero sometido a sobrepresión (efecto Lisse), obtener parámetros hidrogeológicos veraces para mejorar la modelación, afinar la definición de la morfología del bulbo de humidificación, etc.*

ABSTRACT. *In the frame of DINA-MAR R&D+i project, which investigates the most suitable areas for manager aquifer recharge (MAR) in Spain and criteria for the most appropriate designunsaturated zone next to an artificial recharge channel. This article describes the main objectives of the project, the materials and methods, the characteristics of both stations, data collection and their first interpretation after a complete MAR cycle. These results have allowed to improve Soil and Aquifer Treatment Techniques (SATs) applied to increase the infiltration rate from channels, bringing down the infiltration resistance that trapped air produces (Lisse effect), also to obtain more accurate hydrogeological parameters to improve modelling, to get a better description of seepage bulb morphology, etc.*

1. INTRODUCCIÓN

DINA-MAR es un proyecto de I+D+i desarrollado en el Grupo Tragsa cuyo principal objetivo es determinar qué zonas de España son susceptibles para llevar a cabo operaciones de recarga artificial de acuíferos (zonas MAR), con distintos orígenes del agua (especialmente cauces fluviales y depuradoras) y para distintos usos (en especial regadío, abastecimiento y usos medioambientales).

El proyecto se divide en cuatro bloques, y uno de ellos es la aplicación de técnicas de Tratamiento Suelo-Acuífero (SAT), que sirven para incrementar la efectividad de los dispositivos, en función de la litología y del contexto hidrogeológico. Se asume que para aumentar la efectividad de los dispositivos, hace falta incrementar la tasa de infiltración. Para ello, hay que estudiar los parámetros de la zona no saturada, tales como la tensión generada por el aire que se entrapa durante la recarga artificial, la morfología del bulbo de humidificación y las

permeabilidades (horizontal y vertical).

La información sobre los parámetros de la zona no saturada es obtenida a partir de los sensores colocados en dos estaciones elaboradas en el marco de este proyecto y denominadas DINA-MAR ZNS 1 y 2. Ambas se encuentran a escasos metros del canal de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste, dispositivo construido para incrementar los recursos hídricos subterráneos, y utilizarlos para regadío. La obra fue propuesta por el Ministerio de Agricultura y la Junta de Castilla y León (JCL), y ya cuenta con ocho años de operatividad, con volúmenes infiltrados entre 0,5 (Año Hidrológico 2007/08) hasta 12 hm³ (en el A.H. 2006/07) (Tragsa, 2008).

La Cubeta de Santiuste cuenta con una superficie aproximada de 42 km² y se encuentra al oeste de la provincia de Segovia, en la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma. El acuífero se caracteriza por poseer una formación arenosa cuaternaria (Unidad Arévalo), que rellena una cavidad compleja de un sustrato Terciario arcilloso (Facies Cuesta) o areno-arcilloso (Facies Puente Runel). Una descripción detallada aparece en MAPA, 2005 y Fdez. Escalante, 2005.

El dispositivo está compuesto por canales, balsas y pozos, que se encargan de infiltrar los excedentes invernales derivados del río Voltoya, para luego emplearse para riego en el periodo estival. Comienza en un pequeño embalse de toma en el río Voltoya. Desde aquí sale una tubería enterrada de 10 km. de longitud pendiente abajo, que termina en un depósito que vierte a una balsa de decantación. De esta parten los dos canales principales, cuya longitud conjunta excede los 27 km lineales.

El caudal procedente del río Voltoya ronda los 0,5 m³/s, con un periodo de concesión que se extiende desde el primero de noviembre al último día de abril, si bien esta concesión depende del carácter del año hidrológico.

En la figura 1 se muestra el dispositivo sobre la cartografía de isopacas del acuífero arenoso cuaternario. En él se pueden diferenciar los canales, balsas, etc.

En las inmediaciones del “canal nuevo” se han construido las estaciones DINA-MAR ZNS 1 y 2. La primera dista 38 m del canal en sentido opuesto a las líneas de flujo, y la segunda 12 m en el sentido de estas.

2. OBJETIVOS

En el marco del proyecto de gestión de la recarga de acuíferos DINA-MAR, se han instalado dos estaciones de toma de datos de la zona no saturada en las inmediaciones de un canal de recarga artificial de acuíferos. Cada estación recoge cinco datos en continuo, con mediciones cada 15 minutos. En esta etapa se pretende llevar a cabo una aproximación para el estudio de tendencias con medias diarias, postergando para etapas posteriores los estudios sobre la evolución de parámetros a escala horaria o inferior.

Con los 10 tipos de datos registrados por los sensores, en este artículo se pretende comenzar un largo proceso para dar respuesta a los siguientes objetivos:

- Conocer mejor la asimetría del bulbo de humidificación desde los canales de recarga artificial.
- Tener criterios para la disociación de la recarga natural y artificial, de cara a minimizar el error de cierre del balance hídrico, hasta ahora estimado con el modelo HELP (en MAPA, 2005).
- Conocer cómo influye la expansión del bulbo de humidificación en los parámetros de la ZNS, especialmente en la tensión capilar, variaciones en la capacidad de succión y en la humedad a distintas profundidades, factores determinantes para el diseño de las técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs) que se pretenden adoptar.
- Cuantificación de la tasa de avance (H y V) del agua de la recarga artificial (en adelante AR).
- Estimación del aire atrapado en el acuífero (efecto Lisse) o sobrepresión en el acuífero por el



aire entrampado en sus poros y su migración.

- En etapas posteriores se pretende además estudiar la validez de las ecuaciones de Krainenhoff y Ernst en la zona, así como estudiar la influencia de la capilaridad en el flujo darciano.

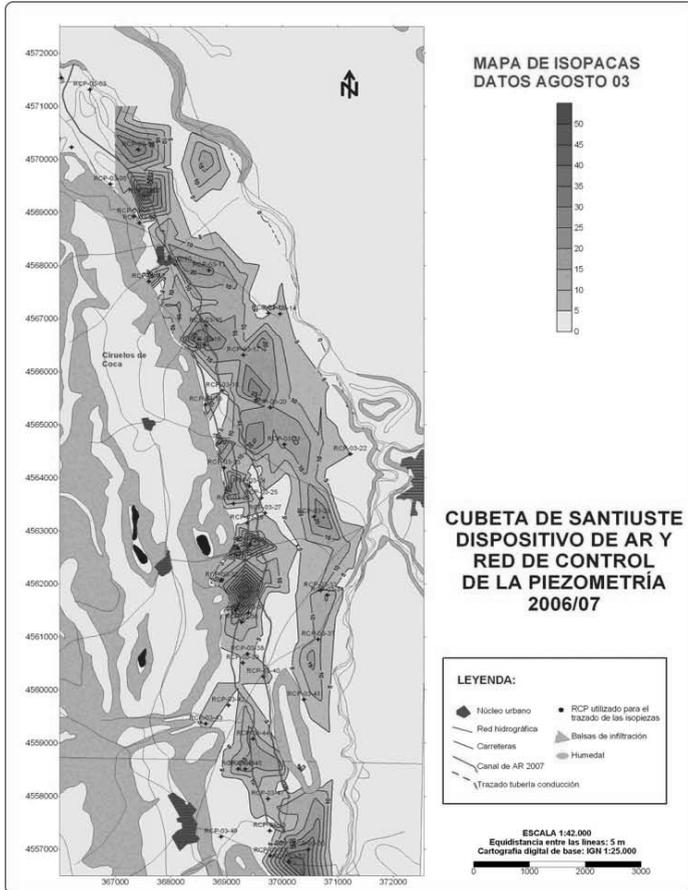


Figura 1. Trazado del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste.

Cabe destacar parte de estos objetivos requieren una secuencia de datos plurianual, por tanto, no pueden ser plenamente interpretados en esta fase, quedando postergados para otras etapas del proyecto de I+D+i.



3. MATERIALES Y MÉTODOS

A comienzos de 2008 comenzó la instalación de las dos estaciones “DINA-MAR ZNS 1 y 2, para el estudio y control de la evolución de la humedad y de la tensión en la zona no saturada del subsuelo”.

Tras estudiar y seleccionar la instrumentación más adecuada para los fines pretendidos, cada estación consta de tres sensores: Dos humidímetros SDEC, que además del porcentaje de humedad miden la temperatura, el superior ubicado en torno a 0,5 m de profundidad (con objeto de que uno quede saturado al durante el ciclo de recarga artificial) y el inferior a 2 m en la estación ZNS-1 y 1,1 en la ZNS-2 (en la que el nivel del agua es más somero). Además cada una cuenta con un tensiómetro Bourdon ubicados entre los dos humidímetros-termómetros, y su membrana se encuentra en torno a 1,05 m, poco por encima del nivel de aguas altas que se consigue al final de cada ciclo de recarga artificial. Su principal misión es aproximarse a una medición del aire atrapado en los poros y la compresión que ejerce sobre los poros de la ZNS. La instalación se inspira en los criterios de Edmunds & Tyler, 2002. Los sensores están dispuestos de modo transversal al canal, uno gradiente hidráulico arriba y otro abajo, con objeto de detectar y cuantificar el avance del bulbo de humidificación y poder conocer mejor su morfología y simetría. La ubicación exacta de ambas estaciones se presenta en la tabla 1.

De este modo quedan registrados en continuo cinco parámetros en cada una de las dos estaciones: Dos medidas de humedad, dos de temperatura y una de tensión capilar. La medición se efectúa cada 15 minutos, y las señales quedan recogidas en un data-logger. Así mismo se ha instalado el instrumental preciso para el teleenvío de la información. La disposición de los sensores se presenta en la figura 2.

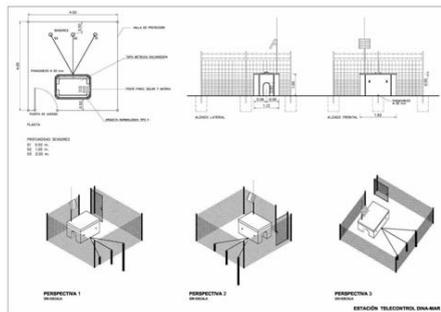


Figura 2. Configuración de las estaciones DINA-MAR ZNS y sensores instalados (tomado de Tragsa, 2008b).

Tabla 1. Ubicación de las estaciones DINA-MAR ZNS-1 Y DINA-MAR ZNS-2 en Segovia.

Estación	Coordenadas	Parcela Sigpac
DINA-MAR ZNS-1	X: 369694 / Y: 4557512	40:221:0:0:1:6244
DINA-MAR ZNS-2	X: 369246 / Y: 4561559	40:65:265:0:7:5376:2

El estudio de la variación del nivel del agua en las inmediaciones de las estaciones se ha realizado por la medición de pozos adyacentes, su inclusión en una cartografía hidrogeológica y un modelo de flujo (Modflow).

La disociación entre el agua infiltrada procedente de la lluvia y de la recarga artificial se lleva a cabo, hasta la fecha, midiendo la humedad en la ZNS mediante humidímetro Eijkelkamp y mediante el modelo HELP (*Hidrological Evaluation Landfill Performance*), elaborando balances hídricos parciales dentro del sistema. La corrección del modelo mediante datos tomados en la ZNS requiere series de datos, al menos, anuales.



4. DATOS

Las estaciones DINA-MAR ZNS han comenzado a estar operativas en junio de 2008, coincidiendo con el corto ciclo de recarga artificial que ha habido en el año hidrológico 2007/08 de ocho días al final de mayo de 2008, mes con intensas precipitaciones. En este periodo fue derivado un caudal del río Voltoya hasta los canales y balsas de infiltración de 516.000 m³.

Tras una etapa de calibración, la toma de datos automatizada se hizo coincidir con el último ciclo de recarga artificial, que comenzó el primero de octubre de 2008 y terminó el 30 de abril de 2009.

4.1. Datos termo-pluvio tomados en la Estación meteorológica SG-02 durante el ciclo de recarga artificial

El siguiente pluviograma y termograma (figuras 3) se han realizado con los datos de la estación meteorológica SG-02, de Nava de la Asunción, distante en torno a 5 km de las estaciones. Esta estación es completa. Los datos disponibles corresponden a la duración del ciclo de recarga (de 1 de octubre de 2008 a 30 de abril de 2009).

El 7º ciclo de recarga artificial comenzó el 1 de octubre de 2008 y terminó el 30 de abril. Durante el primer mes el caudal de entrada en la cabecera del dispositivo tipo canal rondaba los 750 l/s, durante el segundo mes bajó en torno a 500 y desde entonces el caudal entrante oscilaba en torno a 180 l/s. El volumen total recargado en este período fue de 8,0 hm³.

Las circunstancias climáticas en la estación más cercana presentó oscilaciones importantes, con fuertes precipitaciones al primer mes, en la primera quincena de diciembre (nieve), en la primera y última semana de enero y en la segunda de abril. Los valores máximos registrados fueron 21, 27 y 18 de octubre con 10,76; 9,34 y 9,32 mm respectivamente. Las temperaturas mínimas fueron la primera quincena de enero.

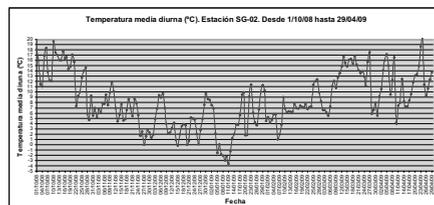
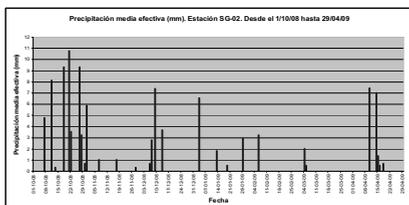


Figura 3 a) y b). Pluviograma y termograma de la estación meteo SG-02, Nava de la Asunción, para la duración del 7º ciclo de gestión de la recarga en la Cubeta de Santiuste.

4.2. Datos registrados en la Estación ZNS-1 (Santiuste) durante el ciclo de recarga artificial

En este periodo se han registrado en continuo los datos descritos en el apartado precedente, con una carencia accidental debida a una avería en el equipo entre los días 2 de octubre y 18 de noviembre y entre el 18 de febrero y uno de mayo en la estación ZNS-1. En estas fechas la toma de datos fue ocasional y manual mediante Microterm. Con las medidas tomadas se han realizado las gráficas siguientes de apoyo a la interpretación (figuras 4 a 7).

ZNS-1. Humidímetro 0,5 m. Desde el inicio de la toma de datos hasta la primera quincena de diciembre la humedad presenta una tendencia ligeramente ascendente, hasta el 12 de diciembre, que presenta un valor de 30,2 %, a partir del cual la tendencia se torna descendente hasta el 28 de diciembre (valor mínimo de

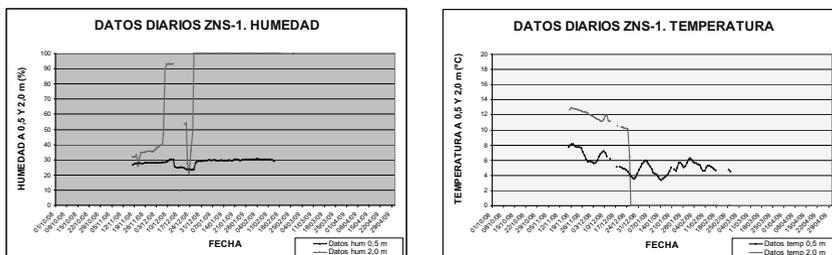


23,44 el 25 de diciembre). A partir de este valor la tendencia es fuertemente ascendente, alcanzando valores de 29,05 % en cuatro días. Más tarde la tendencia presenta escasas oscilaciones de en torno al 2%.

La temperatura presenta fuertes altibajos en períodos aproximadamente semanales. Los mínimos valores se correlacionan con el descenso de humedad de la segunda quincena de diciembre. Se registra un nuevo valle que coincide con un descenso de humedad de en torno al 2% entre el 5 y 15 de enero.

ZNS-1. Humidímetro 2,0 m. El humidímetro instalado a 2 m presenta valores ligeramente ascendentes entre el 30 y 40% desde el inicio del ciclo hasta el 7 de diciembre, cuando se produce un brusco ascenso, alcanzando valores cercanos al 90% durante seis días. Del 20 al 24 de diciembre hay un descenso de 53 a 24 % aproximadamente, el 25 de diciembre aumenta hasta 49,13 % y el 26 de diciembre se registran valores negativos, que se interpretan como que el humidímetro ha entrado en saturación. Por tanto, el bulbo de humidificación ha necesitado 85 días para alcanzar desde el nivel del agua en el canal (situado unos 40 cm sobre la profundidad del sensor) hasta una distancia de 38 metros, lo que representa un gradiente hidráulico cercano al 1%.

El registro térmico es claramente descendente, con valores de 12,6 a 10,14 °C en 35 días, con un ligero cambio de tendencia entre el 10 y 12 de diciembre, que se correlaciona con un fuerte aumento en la humedad. Entre el 24 y 25 de diciembre la temperatura disminuye en torno a 5 grados. El 26 y diciembre comienzan los valores negativos, que se interpretan como que el sensor está saturado. Estos datos coinciden claramente con el registro de la humedad.



Figuras 4 a) y b). Gráficas de humedad y temperatura registradas en la estación DINA-MAR ZNS 1 de Santiuste para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 2,0 m.

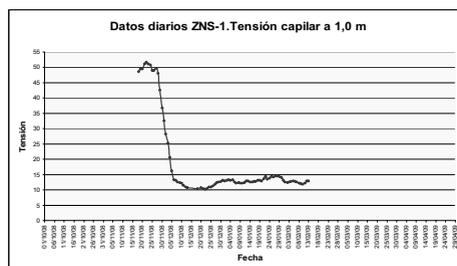


Figura 5. Gráfica de tensión capilar registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1. Profundidad del sensor 1,0 m.



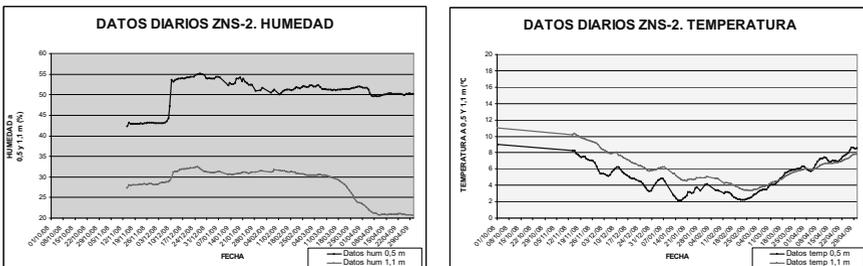
ZNS-1. Tensiómetro 1,0 m. La tensión capilar presenta tendencias claramente proporcionales. Guarda clara proporcionalidad con la tendencia creciente de la segunda semana de diciembre. Durante la tercera semana las fuertes variaciones de humedad coinciden de manera inversamente proporcional con las de tensión. Cuando el sensor ubicado a 2 metros entra en saturación, el tensiómetro ubicado a uno registra una tendencia ascendente en la última semana de diciembre (de 10,99 a 13,03). Desde entonces existe una cuestionable correlación con la humedad registrada a 0,5 m, si bien se registran varios picos entre el 20 y 30 de enero. Valor máximo de 14,56 el 28 de enero. La correlación con la temperatura parece, a grandes rasgos, inversa.

4.3. Datos registrados en la Estación ZNS-2 (Coca) durante el ciclo de recarga artificial

ZNS-2. Humidímetro 1,1 m. El humidímetro instalado a 1,1 m presenta valores ligeramente ascendentes entre el 42 y 45% desde el inicio del ciclo hasta el 8 de diciembre, cuando se produce un brusco ascenso, al igual que ocurrió en ZNS-1, alcanzando el 55% el 26 de diciembre. La tendencia se mantiene estable hasta la segunda semana de enero (52,32% el 12 de enero). La gráfica presenta un nuevo pico, bastante suave, del 13 al 31 de enero, con un valor máximo de 59,13 el 19 de enero. Otro pico más suave aparece entre esta fecha y el 9 de marzo, coincidiendo con un valle en la temperatura. Un nuevo valle se produce entre el 4 y el 16 de abril con registro inverso en el termograma, que presenta un pico más acusado dentro de su tendencia ascendente general.

ZNS-2. Humidímetro 0,5 m. Este registro presenta tendencia ascendente hasta el 9 de diciembre (29 %). Desde ahí se registra un pico hasta el 3 de enero, con un valor máximo el 25 de diciembre de 32,44%. Hasta la segunda quincena de febrero hay claros altibajos (con un valor mínimo de 30,51% el 12 de enero). Del 15 de febrero al 13 de marzo la tendencia es ligeramente descendente, aumentando la pendiente entre esta fecha (29,81%) y el 10 de abril (20,8 %). Desde ahí la gráfica se estabiliza hasta el final del ciclo.

El registro térmico es claramente inversamente proporcional, aunque las pendientes son claramente menos acusadas y las oscilaciones son suaves.



Figuras 6 a) y b). Gráficas de humedad y temperatura registradas en la estación DINA-MAR ZNS 2 de Coca para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 1,1 m.

ZNS-2. Tensiómetro 1,05 m. La tensión capilar del tensiómetro ubicado a un metro presenta tendencias que guardan cierta proporcionalidad con ambos humidímetros, si bien esta relación no resulta tan nítida como en la estación anterior.

El sensor ubicado a 1,1 metros no ha entrado en saturación, según se desprende de la toma de niveles de



piezometría en un pozo cercano, si bien desde mediados de diciembre el bulbo de humidificación parece rozar el sensor y el canal parece haber entrado en control lateral (hay una distancia de unos 10 metros entre el canal principal y el sensor más profundo y 12 al más somero). El nivel del agua en el pozo ha oscilado en torno a 1,15 m respecto al nivel medio del terreno. El gradiente hidráulico resultante es del 6%. Desde entonces la tensión aumentó, con ciertos altibajos, a medida que lo hizo el nivel freático. Los valores mínimos, registrados en torno al 15 de abril, presentan una relación de proporcionalidad en contraposición directa, lo que parece estar supeditado a la ausencia de precipitaciones en este periodo.

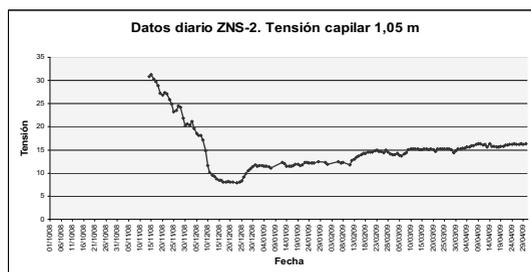


Figura 7. Gráfica de tensión capilar registrada en la estación DINA-MAR ZNS 2. Profundidad del sensor 1,05 m.

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

A tenor de las gráficas presentadas, y en líneas generales, se aprecia una inmediata reacción de los humidímetros ante las precipitaciones. Los más someros (0,5 m) presentan una respuesta muy rápida con gráficas abruptas. Los más profundos presentan retardos de hasta un día y las gráficas son más suaves.

En las crestas de humedad de la segunda semana de diciembre, se aprecia un retardo entre el registro de las precipitaciones y la respuesta del humidímetro de en torno a una semana, lo que es atribuible a que las precipitaciones en este periodo fueron de nieve. El máximo creado tiene una línea descendente muy suave mientras había acumulación de nieve en superficie, de modo que la influencia parece estar activa durante aproximadamente quince días. Un suceso parecido se aprecia en las precipitaciones en forma de nieve de la primera semana de enero.

En ZNS-1 los valores de humedad registrados a 0,5 metros son menores que los registrados a dos metros, si bien hay dos valores correspondientes al 1 y 31 de diciembre en los que la humedad registrada a 0,5 metros es menor. Estos datos de apariencia anómala no han sido extraídos al no registrarse irregularidades en la tensión de la alimentación y al haber medidas similares tomadas durante un día cada 15 minutos.

El 25 de diciembre de 2008 el humidímetro ubicado a 2 m de profundidad entró en saturación al ser alcanzado por el avance del bulbo de humidificación del canal, en control lateral, distante 38 metros. El pozo 49 de la red de control presentaba el nivel freático a 2 m bajo el nivel medio del terreno con fecha 14 de marzo. Este pozo se encuentra a 102 m del canal, y ambos en sentido "ascendente" del gradiente hidráulico, es decir, aguas arriba de las líneas de flujo que presenta la cartografía hidrogeológica, de orientación suroeste-noreste. Con un gradiente hidráulico de 1%, y un tiempo de 80 días necesarios para alcanzar el bulbo al humidímetro desde el canal, la permeabilidad media resultante para este sector es: Kh es de 4,4 m/día y Kv resulta 0,32 m/día, tasa muy inferior a la obtenida en sectores cercanos del acuífero por otras metodologías, con valores cercanos a 15 m/día de Kh y de 0,5 de Kv (MAPA, 2005).



INVESTIGACIONES DE LABORATORIO, INVERNADERO O CAMPO SOBRE LOS PROCESOS
DE TRANSFERENCIA DE MASA Y ENERGÍA EN LA ZONA NO SATURADA DEL SUELO 279

El avance del bulbo, por tanto, presenta una velocidad de entre 4 y 5 m /día en este sector, y la transmisividad resultante es en torno al intervalo 1.200-1.400 m²/día. Repitiendo los cálculos entre el canal y el pozo n° 49, los parámetros son más cercanos a los límites superiores del intervalo.

El gradiente hidráulico del canal de recarga artificial “aguas arriba” ronda el 1 %. En torno a ZNS-2 el flujo es muy superior, habida cuenta de la presencia de un estrato tipo “raña” de matriz arenosa. Aún así se han registrado valores de gradiente hidráulico de hasta el 6% aguas abajo del canal de recarga artificial.

La temperatura a 0,5 metros presenta fuertes oscilaciones con relación de proporcionalidad directa con las precipitaciones e inversa con la humedad. En torno al 10 de diciembre se registra un máximo, una cresta de unos cinco días, que también es registrada a 2,0 metros de profundidad aunque más suavizada y con dos días de retardo. En esta semana hubo precipitaciones de nieve, y el alojamiento del manto albo en superficie parece haber incrementado la temperatura de la ZNS con respecto cuando ha habido precipitaciones líquidas. La tendencia es descendente mientras progresa el bulbo de humidificación, hasta que el sensor entra en saturación.

La tensión capilar a un metro de profundidad presenta tendencia descendente, coincidiendo con las precipitaciones, que en este periodo fueron de nieve. A continuación y durante aproximadamente tres semanas (segunda quincena de diciembre y primera semana de enero) la tensión presenta un valle. El punto de inflexión viene a coincidir con dos días antes de que el humidímetro 2,0 m entrara en saturación. Antes de registrarse este incremento en la vertical, la tensión registra un máximo, atribuible a que el bulbo de humidificación había alcanzado la zona de oscilación (entre 2,0 y 2,4 metros de profundidad), si bien el ascenso del nivel no provoca un ascenso de tensión, sino una M mayúscula en la gráfica durante un intervalo de cinco días. Desde entonces la tendencia es creciente sin apenas rebotes.

En la estación ZNS-2 los valores de humedad registrados a 0,5 metros son también menores y semiparalelos que los registrados a 1,1 metros, si bien la gráfica es mucho menos suave. Al igual que en la estación previa hay un retardo entre la caída de la nieve y el incremento de humedad de unos tres días. El sensor más profundo no se ha llegado a saturar en este ciclo, si bien a partir del 20 de marzo aproximadamente hay una tendencia descendente clara, que coincide con un ascenso del nivel del agua en el pozo más cercano de menos de cinco centímetros bajo en sensor más profundo. De este modo, cuando más cerca está el nivel freático, menor es la humedad para este caso. En este tramo el material testificado es Arena marrón de grano medio con bastante grava y algo de arcilla, bajo un estrato con abundancia de cantos de cuarcita.

La temperatura en esta estación presenta un comportamiento peculiar. Presentan también un semiparalelismo los valores registrados a 0,5 y 1,1 m, con una curva más suave a mayor profundidad, si bien en torno al 18 de marzo, hay una inversión de tendencia, la temperatura del sensor más superficial es más caliente o similar, lo que parece que también está supeditado al ascenso del bulbo. Ambas gráficas presentan valores muy parecidos, separándose en un intervalo de fuertes precipitaciones, con mayores temperaturas el sensor más superficial.

La tensión presenta un carácter descendente con altibajos hasta las nevadas de la primera semana de diciembre, que traen un valle de morfología asimétrica de tres semanas de duración, coincidiendo con un periodo sin precipitaciones.

En general se aprecia un descenso en la tensión capilar en torno a dos días después de las precipitaciones.

El tramo en que se igualan las temperaturas en ambos sensores coincide con una línea muy tendida y ligeramente ascendente, hasta mediados de marzo, en que acontecen fuertes lluvias y se registra un nuevo aumento de la tensión.



6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha llevado a cabo un primer análisis de los datos de humedad, temperatura y tensión recogidos en las estaciones DINA-MAR ZNS, adyacentes al canal de recarga artificial de Santiuste, a lo largo de un ciclo. Se ha controlado además el caudal circulante, la precipitación y la temperatura ambiente, lo que ha permitido iniciar correlaciones entre estos parámetros a escala diaria.

En la estación **ZNS-1** se han registrado valores de humedad anómalos, que podrían ser debidos a la influencia de fuertes precipitaciones y a la saturación de un sensor. También podría influir el asentamiento del terreno en torno a los sensores en su primer año de operatividad.

La temperatura a 0,5 metros presenta fuertes oscilaciones, relación de proporcionalidad directa con las precipitaciones y se correlaciona de manera inversa con la humedad.

La tensión capilar presenta una tendencia evolutiva “especial”: Al aproximarse el frente de agua la tensión registra un máximo, para luego descender, posiblemente porque la llegada del bulbo de humidificación provoca una compresión del aire en la zona no saturada, que luego se distiende. Este mismo fenómeno se ha observado en ZNS-2, donde además, en general, se aprecia un descenso en la tensión capilar en torno a dos días después de las precipitaciones. La forma “extraña” de la curva incita a aplicar otras tecnologías para su interpretación en el futuro (p.e. *gas chambers*, en Massmann et al, 2002).

De acuerdo con los datos obtenidos sobre la expansión lateral del bulbo de humidificación, su morfología es claramente asimétrica a ambos lados del canal, con pendiente tendida “aguas arriba” y pendientes en torno a cinco veces más inclinadas aguas abajo.

Se han observado permeabilidades más bajas (un cuarto en Kh y un tercio en Kv) de las obtenidas mediante ensayos de bombeo (en MAPA, 2005). Es por tanto recomendable recalcular el balance hídrico modelado mediante HELP, ya que la recarga natural parece ser menor que la calculada en esta zona.

En **ZNS-2** la temperatura registrada en los sensores guarda una cierta correlación inversa con la humedad. La inversión de tendencia en torno al 18 de marzo parece estar motivada por el ascenso del bulbo.

El efecto Lisse se manifiesta como el principal impacto que minimiza la efectividad de estos canales de recarga artificial. Las observaciones presentadas abren la puerta a una interesante línea de investigación tendiente a reducir este efecto mediante técnicas SAT.

Agradecimientos. Este artículo ha sido posible gracias al equipo del proyecto de I+D+i DINA-MAR del Grupo Tragsa, C.P. 30-13.053.

REFERENCIAS

- Edmunds, W.M & Tyler, S.W. (2002). Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions. *Hydrogeology Journal Vol 10, n° 1. Feb 2002. AIH-Springer.*
- Fernández Escalante, A.E, 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 2005.
- MAPA, 2005. Asistencia técnica para el seguimiento y modelización de la recarga artificial en la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia). DGDR-TRAGSATEC (no publicado disponible para consulta en la biblioteca del MARM, antiguo MAPA).
- Massmann, G., Pekdeger, A. & Merz, C. (2002). Geochemical processes during riverbank filtration in a polder region bordering the river Oder, Germany. Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). *Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002.* Balkema Publishers-AIH.
- TRAGSA, 2008. DINA-MAR. Proyecto para la gestión de la recarga de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Memoria de la anualidad 2008. Grupo Tragsa. Documento interno no publicado.
- TRAGSA, 2008b. Proyecto de obra de las estaciones DINA-MAR ZNS. Grupo Tragsa. Documento interno no publicado. <http://www.dina-mar.es>. Mayo de 2009.