

EFFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO SOBRE SU CONTENIDO EN AGUA EN ÁREAS ALUVIALES DE USO AGRÍCOLA DE LA RIOJA ALTA.

J.J. Martínez-Bastida¹, M. Arauzo¹, M. Valladolid²

¹ Departamento de Contaminación Ambiental, Instituto de Ciencias Agrarias, Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC, Serrano 115 dpdo. 28006 Madrid. E-mail: martinez.bastida@ccma.csic.es; mercedes@ccma.csic.es

² Departamento de Biodiversidad y Biología Evolutiva. Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. E-mail: marval@mncn.csic.es

Palabras clave: Suelo agrícola, Sondas FDR, humedad volumétrica, drenaje, riego.

RESUMEN. *El conocimiento de la dinámica del agua en el suelo permite mejorar la precisión de las estrategias en el manejo agrícola. El objetivo de este estudio ha sido analizar los efectos de las propiedades físicas del suelo sobre su contenido en agua en tres parcelas situadas sobre La Rioja Alta (España). Para ello, se han interpretado los datos obtenidos a partir de tres sondas FDR situadas en el perfil del suelo a tres niveles de profundidad, que registran datos con frecuencia horaria, durante los periodos de cultivo e intercultivo de 2008. Los resultados indican que los procesos de drenaje se ven favorecidos por la abundante presencia de gravas en el suelo y por los aportes de agua de elevada intensidad en las Parcelas 1 y 2. En la Parcela 3, sin gravas y con un alto contenido en limos y arcillas, el proceso de percolación es mucho más lento.*

ABSTRACT. *The knowledge of the water soil movement allows to a better efficiency in agriculture management. The objective of this study was to analyse the effect of soil properties into the water soil content of three plots located in La Rioja Alta (Spain). Three FDR probes located at different depths in the soil profile were used to record data on an hourly basis during the crop and intercrop period of 2008. Results show that a high proportion of gravels in the textural composition of soils and intense water inputs favour the drainage process in Plots 1 and 2. Drainage process in Plot 3, without gravels in the soil profile and with a high proportion of silt and clay, is much slower than in the other plots.*

1. INTRODUCCIÓN

La optimización de los sistemas de riego constituye una cuestión clave para desarrollar unas buenas prácticas agrícolas y reducir los procesos de drenaje y el riesgo de lixiviación de contaminantes de origen agrícola. De ahí que en las últimas décadas se hayan desarrollado abundantes estudios en esta dirección (Díez *et al.* 1997; Vázquez *et al.* 2003; Domingo-Olivé *et al.* 2005). La disponibilidad de técnicas para la monitorización en continuo del agua del suelo resulta de gran interés en el ámbito agrícola, ya que permite conocer su dinámica en el suelo y adaptar el manejo del riego a las condiciones específicas de cada escenario (tipo de suelo, cultivo, etc.). Las sondas basadas en la tecnología FDR (Frequency Domain Reflectometry) constituyen una de las herramientas más ampliamente utilizadas en la última década para tal fin (Hidalgo *et al.* 2003).

Este estudio se ha desarrollado en tres parcelas agrícolas situadas en la superficie del Aluvial del Oja (La Rioja Alta, España). En la Rioja Alta existe un gran desarrollo de la agricultura de regadío, habiéndose detectado importantes problemas de contaminación difusa por nitrato de origen agrícola en amplias zonas del Acuífero Aluvial del Oja (Arauzo *et al.* 2006). Actualmente hay una Zona Vulnerable a la contaminación por nitrato declarada en el sector noreste del Acuífero del Oja. Resulta necesario, por tanto, optimizar las prácticas de fertilización y riego en la región.

Los suelos de las tres parcelas seleccionadas difieren principalmente en su grado de pedregosidad y en el contenido en arcillas y limos. También existen diferencias en el modelo agrícola que se aplica en cada una de ellas (agricultura ecológica, agricultura convencional y agricultura integrada). El objetivo de este estudio ha sido analizar los efectos de las propiedades físicas del suelo sobre su contenido en agua mediante la interpretación de los datos de humedad volumétrica, obtenidos con frecuencia horaria a partir de sondas FDR. Asimismo, se han explorado las relaciones de causalidad entre las propiedades edáficas y el contenido de agua en el suelo a las

distintas escalas de observación mediante técnicas estadísticas, a fin de conocer con mayor detalle su dinámica y adecuar las recomendaciones de riego a las circunstancias específicas de cada agrosistema.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las tres parcelas seleccionadas para este estudio se sitúan en la zona aluvial de la cuenca del río Oja (La Rioja, España), donde se desarrolla agricultura intensiva de regadío.

La Parcela 1 se sitúa sobre las terrazas aluviales más recientes de la zona media de la cuenca del río Oja (UTM: 30T 0503531 4702049). Tiene una superficie de 5800 m² y en ella se desarrolla un modelo de agricultura ecológica, con rotación de cultivos. El suelo es un *Fluvisol esquelético* (FAO, 2006) con un elevado contenido en gravas (41% en los primeros 0.2 m) de tamaños variables (2-230 mm de diámetro) que se incrementa en profundidad (Tabla 1). La textura del suelo es franca hasta 0.5 metros (Tabla 1). El espesor de la zona no saturada fluctúa entre 3 y 4 metros a lo largo del año (Arauzo et al. 2006). Durante 2008 se desarrolló un periodo de cultivo de patata (*Solanum tuberosum L*), del 15 de Abril al 13 de Octubre, y dos periodos de intercultivo, del 1 de Enero al 14 de Abril y del 14 de Octubre al 31 de Diciembre. Se realizaron 20 riegos por aspersión durante el periodo de cultivo, con un aporte total de 247 L m⁻² (Tabla 2). Los tres primeros riegos se aplicaron durante seis horas, y el resto entre 2 y 4 horas. El agricultor estableció la frecuencia y la dosis de riego en base a observaciones propias con arreglo a las prácticas estándar de la región.

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo en las Parcelas 1, 2 y 3, a 0.2, 0.5 y 1.0 m de profundidad

Parcela	Prof. (m)	Gravas (%)	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	Textura (USDA)
Parcela 1	0.2	41	25	10	24	F
	0.5	40	26	9	25	F
	1.0	72	24	1	3	Ar-F
Parcela 2	0.2	19	18	28	35	F-Ar
	0.5	43	16	20	21	F-Ar
	1.0	77	14	6	3	F-Ac-Ar
Parcela 3	0.2	0	29	25	46	F
	0.5	0	27	23	50	F-L
	1.0	0	29	21	50	F-L

Ac=Arenosa; Ar = Arcillosa; F=Franca; L= Limosa

La Parcela 2 también se sitúa sobre las terrazas aluviales más recientes de la zona media de la cuenca del río Oja (UTM: 30T 505200 4697683). Su superficie es de 30000 m² y el modelo que se aplica en la misma es de agricultura convencional, con rotación de cultivos. El suelo es un *Fluvisol esquelético* (FAO, 2006) con un alto contenido en gravas de tamaños variables (18% en los primeros 0.2 metros) que se incrementa en profundidad (Tabla 1). El espesor de la zona no saturada fluctúa entre 3 y 4 metros a lo largo del año (Arauzo et al. 2006). Se cultivó Gisante (*Pisum sativum*), entre el 14 de Marzo y el 2 de Julio de 2008, con dos periodos de intercultivo (1 de Enero- 13 de Marzo y 3 de Julio- 31 de Diciembre). Los riegos por aspersión se realizaron en dos aplicaciones de tres horas cada una a finales de junio (Tabla 2). El agricultor estableció la frecuencia y la dosis de riego en base a observaciones propias según las prácticas estándar de la región.

La Parcela 3 se sitúa sobre las terrazas aluviales más recientes de la zona baja de la cuenca del río Oja (UTM: 30T 510038 4712250), dentro del perímetro establecido como Zona Vulnerable a la contaminación por nitrato por la Comunidad de La Rioja. Tiene una superficie de 24700 m² y en ella se desarrolla un modelo de agricultura integrada, con rotación de cultivos. El suelo es un *Fluvisol calcárico* (FAO, 2006), con ausencia de gravas y una textura franca en los primeros 20 cm que se torna franco-limosa en el resto del perfil del suelo (Tabla 1). El espesor de la zona no saturada fluctúa entre 3 y 4 metros a lo largo del año (Arauzo et al. 2006). El 15 de Febrero de 2008 se sembró Remolacha (*Beta vulgaris*), con un periodo de intercultivo previo (1 de Enero-14 de Febrero

de 2008). La cosecha tuvo lugar a principios de 2009. Se realizaron 19 riegos por aspersión durante el periodo de cultivo, con un aporte total de 393 L m⁻² (Tabla 2). El agricultor estableció la frecuencia y la dosis de riego en base a las indicaciones de la cooperativa encargada del asesoramiento para el desarrollo de la agricultura integrada.

Tabla 2. Aportes de agua por precipitación y riego y precipitaciones durante los periodos de cultivo e intercultivo en las Parcelas 1, 2 y 3.

Parcela	Precipitación (L m ⁻²)	Riego (L m ⁻²)	Aporte total (L m ⁻²)
Parcela 1			
Intercultivo (01/01/08-14/04/08)	113	0	113
Patata (15/04/08-13/10/08)	410	247	657
Intercultivo (14/10/08-31/12/08)	229	0	229
Total año 2008	752	247	999
Parcela 2			
Intercultivo (01/01/08-13/03/08)	44	0	44
Guisante (14/03/08-02/07/08)	390	11	401
Intercultivo (14/10/08-31/12/08)	282	0	282
Total año 2008	716	11	727
Parcela 3			
Intercultivo (01/01/08-14/04/08)	18	0	18
Remolacha (15/02/08-31/12/08)	600	393	993
Total año 2008	618	393	1011

Los aportes de agua recibidos por cada una de las parcelas durante el 2008, debidos a la precipitación y riego, se muestran en la Tabla 2.

En cada una de las parcelas, las medidas de humedad en el perfil del suelo se realizaron mediante tres sondas FDR modelo ECH₂O EC-20 (Decagon Devices, Pullman, Washington, USA), situadas a 0.2, 0.5 y 1.0 m de profundidad y conectadas a un *data-logger* Em50, que registra los datos con frecuencia horaria. La humedad volumétrica del suelo se obtuvo a partir de las medidas de capacitancia, según la siguiente ecuación de calibración:

$$\theta = 0.000424 * X - 0.29 \quad (1)$$

donde θ (m³ m⁻³) es la humedad volumétrica del suelo y X (mV) la medida de capacitancia del Em50 (Decagon Devices, 2006).

Los aportes de agua (precipitación+riego) fueron registrados con frecuencia horaria, mediante un pluviómetro ECRN (Decagon Devices, Pullman, Washington, USA) conectado al *data-logger* Em50.

Para la interpolación de los datos horarios de humedad volumétrica al perfil del suelo se empleó el modelo de interpolación Kriging (Mathéron, 1963) mediante el programa Surfer 8.02 (Golden Software, Golden, Colorado, USA). Para una interpretación más precisa de la dinámica del agua en el suelo se seleccionó un intervalo temporal (8 de Mayo-7 de Junio de 2008), en el que se observaron sucesivos procesos de percolación del agua hacia las capas profundas en las tres parcelas. El propósito fue determinar los desfases temporales del agua en su movimiento a través de la columna de suelo, con respecto a la intensidad de los aportes.

Se han realizado tres Análisis de la Covarianza (ANCOVA) y un Análisis de Regresión Múltiple con el fin de: (1) valorar el efecto de las propiedades físicas del suelo sobre el movimiento del agua en el mismo (ANCOVA 1); (2) analizar la contribución parcial de otras variables como el aporte de agua, la intensidad del aporte y la humedad inicial, en la dinámica del agua en el suelo (Análisis de Regresión Múltiple); (3) evaluar si existen diferencias en los procesos de percolación del agua en el suelo entre los periodos de cultivo e intercultivo (ANCOVAS 2 y 3).

En el ANCOVA 1 se empleó como variable dependiente el tiempo de desplazamiento del agua en el suelo durante los procesos de percolación. Para ello, se determinaron, en cada uno de los episodios del ciclo anual en los que se produjo percolación hasta 1 metro de profundidad, las horas que transcurren desde que se detecta el

aumento de humedad a 0.2 metros de profundidad, hasta que se alcanza el pico más alto de humedad en cada uno de los tres niveles de profundidad a los que corresponden los datos de las sondas FDR (0.2, 0.5 y 1.0 m). La variable independiente en este análisis fue la Parcela, que tiene tres niveles (Parcela 1, Parcela 2 y Parcela 3). Con el fin de anular la heterogeneidad causada sobre la variable dependiente por el efecto de otras variables influyentes y poder interpretar los resultados del análisis en base, únicamente, a las diferencias en la composición granulométrica del suelo, se incluyeron las siguientes covariantes: profundidad en el suelo, humedad volumétrica inicial, aportes de agua e intensidad media de los aportes de agua. Los aportes de agua se obtuvieron de la suma total del conjunto de eventos de lluvia y riegos que preceden a cada incremento de humedad volumétrica a 1 metro de profundidad. La intensidad media de los aportes de agua se estimó como el cociente entre los aportes de agua y el número de horas del intervalo temporal en el que ocurre el conjunto de los eventos de lluvia y riego considerados en cada caso. La humedad inicial se corresponde con el valor de humedad volumétrica registrado en cada uno de las sondas FDR en el momento previo al aporte de agua. En los ANCOVAS 2 y 3, la variable dependiente fue, nuevamente, el tiempo de desplazamiento del agua en el suelo de las Parcelas 1 y 2, respectivamente, durante los procesos de percolación hasta 1 metro de profundidad. El tipo de periodo, con dos niveles (cultivo e intercultivo), fue la variable independiente, y las covariantes fueron: la profundidad, la humedad volumétrica inicial, los aportes de agua y la intensidad media de los aportes. En el caso de la Parcela 3 no se realizó ningún tipo de análisis debido a la corta duración del periodo de intercultivo, durante el cual, no se detectaron incrementos importantes de humedad en la sonda situada a 1 metro de profundidad.

En el Análisis de Regresión Múltiple se emplearon las covariantes del ANCOVA 1 (profundidad en el suelo, humedad volumétrica inicial, aportes de agua e intensidad media de los aportes de agua) como variables independientes y el tiempo de desplazamiento de agua durante los procesos de percolación en el suelo como variable dependiente, con el fin de determinar la contribución específica de cada uno de ellos.

3. RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran los aportes diarios de agua y las variaciones de humedad volumétrica en el perfil del suelo de cada una de las parcelas durante 2008. En la Parcela 1 se observa un mayor contenido de humedad en la capa superficial, que disminuye progresivamente con la profundidad. El agua, en su movimiento a través del perfil del suelo de esta Parcela, alcanza las capas profundas durante la fase inicial del periodo de cultivo de la patata (aportes por lluvia y por riego) y durante las precipitaciones otoñales (segundo periodo de intercultivo). No obstante, la cantidad de agua que percola hasta las capas profundas es reducida, por lo que no se intuyen importantes eventos de drenaje hacia la zona saturada. Los riegos en la Parcela 1 se distribuyen en la segunda mitad del periodo de cultivo, durante los meses de julio y agosto, y aumentan la humedad en las capas superficiales, aunque no representan un aumento destacable en el contenido de agua en los niveles de mayor profundidad. En la Parcela 2, los mayores niveles de humedad se localizan en los estratos medios del perfil del suelo, mientras que los valores más bajos se dan en las capas superficiales, especialmente durante el verano. Se observan intensos procesos de drenaje durante la mayor parte del periodo de cultivo del guisante (asociadas a aportes de agua por precipitación), y durante las precipitaciones otoñales en el segundo periodo de intercultivo. El escaso riego aplicado no muestra incidencia destacable sobre el nivel de humedad. En la Parcela 3, el agua es retenida en las capas superficiales, dando lugar a niveles de humedad muy bajos en las capas más profundas del suelo (en concordancia con la composición granulométrica del mismo, de carácter limoso, véase Tabla 1), si bien se observan desplazamientos de escasa entidad hacia las capas profundas en la segunda mitad del periodo de cultivo.

El desplazamiento del agua a través del perfil del suelo parece producirse con mayor rapidez en las Parcelas 1 y 2 (especialmente, en esta última) y de un modo mucho más lento en la Parcela 3 (Figura 2). En general, los intensos y rápidos incrementos de la humedad en la capa superior del suelo de las Parcelas 1 y 2 tras los aportes de agua, derivan en un rápido desplazamiento del agua hacia las capas inferiores. Se observa, en todos los casos, que la mayor intensidad de los aportes de agua determina una mayor rapidez de percolación del agua en el suelo, aunque otras variables que pueden afectar al tiempo de desplazamiento del agua en el perfil del

suelo, son el grado de humedad inicial en las distintas capas del suelo (relación negativa) y el aporte total de agua (relación positiva).

Se observan diferencias significativas entre las tres parcelas, con respecto al efecto de las propiedades físicas del suelo (composición granulométrica) sobre el tiempo de desplazamiento del agua en el perfil del mismo (ANCOVA 1; Tabla 3). Los valores de la variable dependiente en la Parcela 3 (textura fina, sin grava) son significativamente mayores que en las Parcelas 1 y 2 (con grava). Con respecto al ANCOVA 2, no se observan diferencias significativas en el tiempo de desplazamiento del agua entre el periodo de cultivo y el periodo de intercultivo de la Parcela 1 (Tabla 3). En la Parcela 2 (ANCOVA 3), sin embargo, sí se obtiene significación para la variable periodo (Tabla 3), con tiempos significativamente mayores durante el periodo de intercultivo. Todas las covariantes muestran correlación significativa con el tiempo de desplazamiento del agua en el suelo (Tabla 4). En el caso de la profundidad y el aporte de agua, la correlación es positiva, mientras que la humedad inicial y la intensidad del aporte de agua presentan una correlación negativa. La covariante con mayor contribución parcial es la profundidad, seguida de la intensidad de los aportes de agua (Tabla 4).

Tabla 3. Resultados de los ANCOVAS realizados para determinar el efecto de las propiedades edáficas del suelo en las Parcelas 1, 2 y 3 (ANCOVA 1) y del periodo (cultivo e intercultivo) en las Parcelas 1 y 2 (ANCOVAS 2 y 3) sobre el tiempo de desplazamiento del agua en el perfil del suelo (variable dependiente).

ANCOVA	Variable independiente	SS	gl	MS	F	p
ANCOVA 1	Parcela (1, 2 y 3)	15978.40	2	7989.20	13.68571	0.000003
ANCOVA 2	Periodo (cultivo e intercultivo) en la Parcela 1	0.06	1	0.059	0.000118	0.991364
ANCOVA 3	Periodo (cultivo e intercultivo) en la Parcela 2	2586.54	1	2586.54	5.52705	0.023270

SS= suma de cuadrados; gl= grados de libertad; MS= media cuadrada; F= F-Snedecor; p= valor de p

Tabla 4. Coeficiente de correlación parcial, obtenido mediante Análisis de Regresión Múltiple, de las covariantes empleadas en el ANCOVA 1 (profundidad, humedad inicial, aporte de agua e intensidad de los aportes) con respecto al tiempo desplazamiento del agua en el suelo.

Covariantes	Beta	Error estándar de Beta	B	Error estándar de B	t(153)	p
Profundidad	0.374089	0.070753	34.0254	6.43539	5.28723	0.000000
Humedad volumétrica inicial	-0.176708	0.071751	-65.7303	26.68954	-2.46277	0.014896
Aporte de agua	0.219243	0.079069	0.4158	0.14994	2.77282	0.006248
Intensidad del aporte de agua	-0.270877	0.078969	-4.2281	1.23261	-3.43019	0.000776

$R^2=0,27$; R^2 ajustada=0,25

Beta=coeficiente estandarizado de correlación parcial; B=coeficiente no estandarizado de correlación parcial; t=t de student; p=valor de p

4. DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la importancia de las propiedades físicas del suelo en la comprensión de la dinámica del agua en los suelos agrícolas y sus procesos asociados (drenaje y lixiviación). La elevada pedregosidad que caracteriza los suelos de las Parcelas 1 y 2 les confiere una alta conductividad hidráulica, que incrementa el riesgo de lixiviación de contaminantes. De ahí, que el agua se mueva con mayor velocidad a través del perfil de estos suelos respecto al de la Parcela 3. Las diferencias observadas en la intensidad de los procesos de percolación del agua hacia las capas profundas entre las Parcelas 1 y 2 (mucho mayores en la Parcela 2) podrían explicarse por el efecto de la intensidad de los aportes de agua, que es una variable con una contribución importante en el tiempo de desplazamiento del agua en el suelo (véase Tabla 4). En la Parcela 2, los aportes de agua se produjeron con mayor intensidad (véase Figura 2), lo que propició la percolación rápida hacia las capas profundas. Este factor puede explicar también la mayor velocidad de percolación del agua en el perfil del suelo de la Parcela 2 durante el periodo de cultivo, dado que los eventos de lluvia fueron más intensos que en el periodo de intercultivo.

Parece evidente que la dosificación del riego adquiere, por tanto, una especial importancia en los suelos aluviales pedregosos, como principal medida para la mitigación de la contaminación difusa de las aguas subterráneas. El fraccionamiento de los aportes de agua en eventos de menor intensidad permite al cultivo absorber el agua antes de que se desplace hacia las capas profundas. De este modo, se mantiene la humedad en el nivel radicular del suelo y se evita el drenaje y la lixiviación de contaminantes hacia la zona saturada. Esta

situación puede observarse en el caso de la Parcela 1, donde los riegos se producen en fases de crecimiento avanzado del cultivo durante los meses de verano, coincidiendo con momentos de gran evapotranspiración que reducen el riesgo de drenaje hacia capas profundas. En la Parcela 2, la corta duración del periodo de cultivo y los frecuentes eventos de lluvia durante el mismo, limitaron la aplicación de riegos durante 2008. Sería recomendable, no obstante, utilizar cultivos de cobertera que protejan el suelo tras la cosecha (en periodos de intercultivo), ya que las frecuentes lluvias de otoño e invierno generan un elevado riesgo de drenaje y lixiviación de contaminantes, a causa de la mayor desprotección del suelo y la menor evapotranspiración.

La Parcela 3, por el contrario, presenta un suelo sin gravas, con un mayor contenido en arcillas y limos que dificulta y retarda notablemente la percolación del agua. El incremento de la proporción limosa en profundidad explica que la humedad tienda a quedar retenida en las capas superiores. Las propiedades físicas de este tipo de suelo constituyen, por tanto, una barrera eficaz contra los procesos de drenaje y lixiviación. Dado que se trata de un suelo que se encuentra en una Zona Vulnerable, es probable que la contaminación de las aguas subterráneas de esta zona proceda del sector superior del acuífero, cuyos lixiviados son arrastrados por efecto del flujo subterráneo (Arauzo et al. 2006).

5. CONCLUSIONES

- La elevada pedregosidad que caracteriza a los suelos de las Parcelas 1 y 2 (*Fluvisol esquelético*) situadas en la zona media de la cuenca del Oja, les confiere una alta conductividad hidráulica, incrementando el riesgo de lixiviación de contaminantes de origen agrícola. Por el contrario, la ausencia de gravas y la elevada proporción de limos y arcillas en el suelo de la Parcela 3, situada en la parte baja de la cuenca del Oja (materiales aluviales más finos que en las partes altas de la cuenca), dificulta y retarda notablemente la percolación del agua y retiene la humedad en las capas superiores del suelo, constituyendo una barrera eficaz frente a la lixiviación.
- La mayor intensidad de los aportes de agua durante el periodo de cultivo, favorece una percolación más rápida del agua en los suelos pedregosos. De ahí, la necesidad de moderar los aportes de agua con eventos de menor intensidad, siempre que sea posible (moderación de los riegos), con el fin de que el cultivo absorba el agua antes de que se desplace hacia las capas profundas. Los procesos de percolación debidos a la precipitación son frecuentes en los suelos aluviales pedregosos.
- En las Parcelas 1 y 2 es recomendable utilizar cultivos de cobertera que protejan el suelo durante los periodos de intercultivo, ya que las frecuentes lluvias del otoño-invierno generan en este tipo de suelos un elevado riesgo de drenaje y lixiviación de contaminantes.

Agradecimientos. Este trabajo de investigación se ha financiado a través del Proyecto AGL2006-07087/AGR. Agradecemos muy especialmente a Jesús Ochoa, Carlos Metola, Ángel Samaniego y Gonzalo Samaniego su valiosa colaboración en este estudio.

REFERENCIAS

- Arauzo, M., M. Valladolid, J.J. Martínez-Bastida, C. Gutiérrez, 2006. Dinámica espacio-temporal del contenido en nitrato de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Oja (La Rioja, España): vulnerabilidad del acuífero aluvial. *Limnetica*, 25 (3-4), 141-150.
- Díez, J.A., R. Roman, R. Caballero, A. Caballero, 1997. Nitrate leaching from soils under a corn-wheat-corn sequence, two irrigation schedules and three types of fertilizers. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 65, 189-199.
- Domingo-Olivé, F., J. Serra, A. Roselló, N. Teixidor, 2005. Lavado de nitratos en un cultivo de maíz con diferentes tipos de riego. En: *VII Jornadas de Investigación de la Zona No Saturada del Suelo*. F.J. Samper y A. Paz. (eds.), 115-130. Universidade da Coruña, Xunta de Galicia, La Coruña.
- FAO, 2006. World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. IUSS-ISRIC-FAO. World Soil Resources Reports No. 103, Rome.
- Hidalgo, J., M. Pastar, J.C. Hidalgo, 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en el olivar. En: *Investigación de la zona no saturada, Vol. VI, ZNS'03*. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero (eds.), 171-176.
- Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology* 58,1246-1266.
- Statsoft, Inc. 2003. *Statistica for Windows*. Tulsa, Oklahoma.
- Vázquez, N., A. Pardo, M.L. Suso, M. Quemada, 2003. Drenaje y lixiviación de nitratos en una sección transversal de un sistema de cultivo hortícola con riego por goteo y acolchado plástico. En: *Investigación de la zona no saturada, Vol. VI, ZNS'03*. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero (eds), 33-38. Instituto Técnico Agrario de Castilla León, Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid, España.

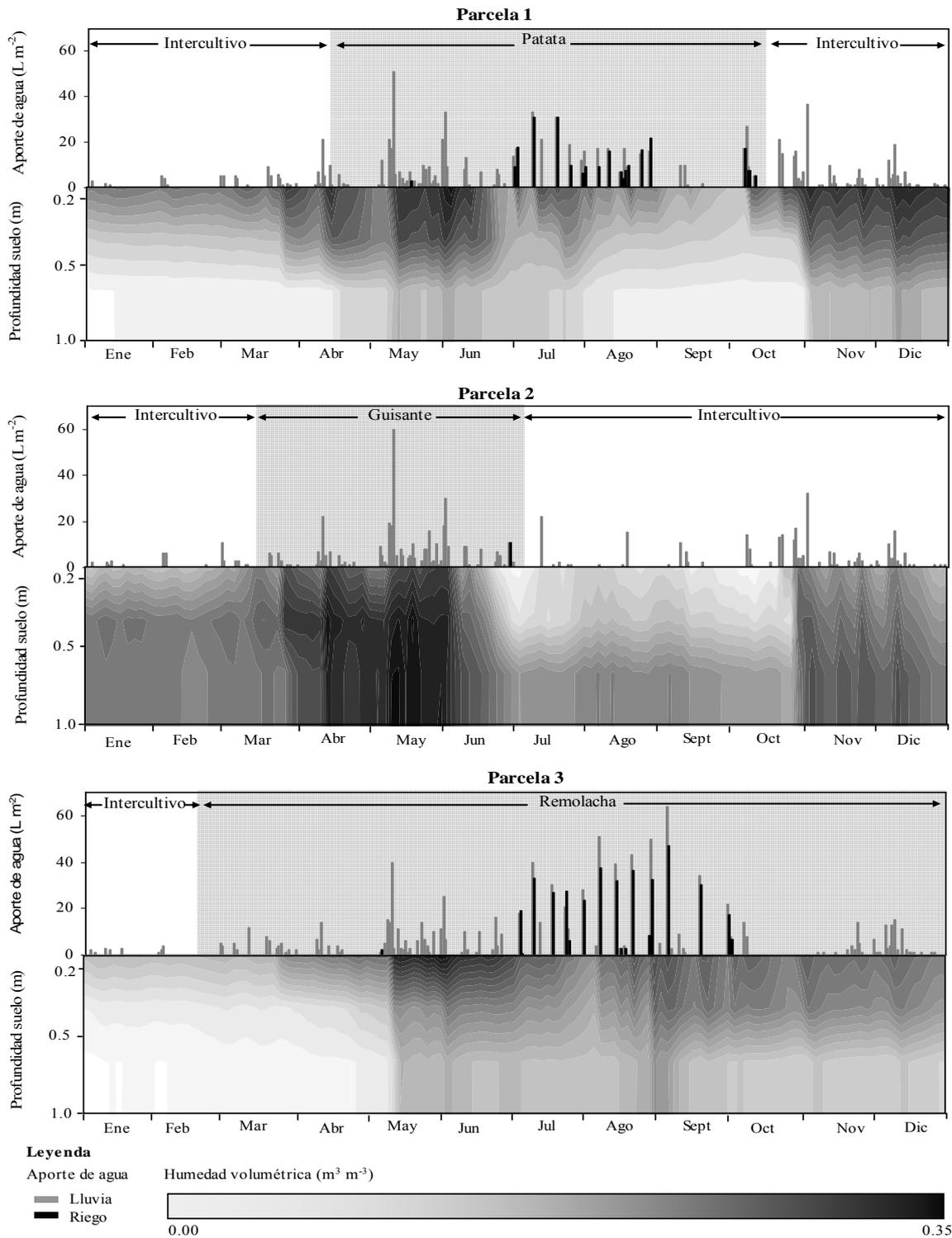


Figura 1. Aporte diario de agua (lluvia + riego; arriba) y variaciones horarias de la humedad volumétrica (abajo) en el perfil del suelo de las Parcelas 1, 2 y 3 durante el 2008. Se muestran los periodos de cultivo e intercultivo de cada parcela.

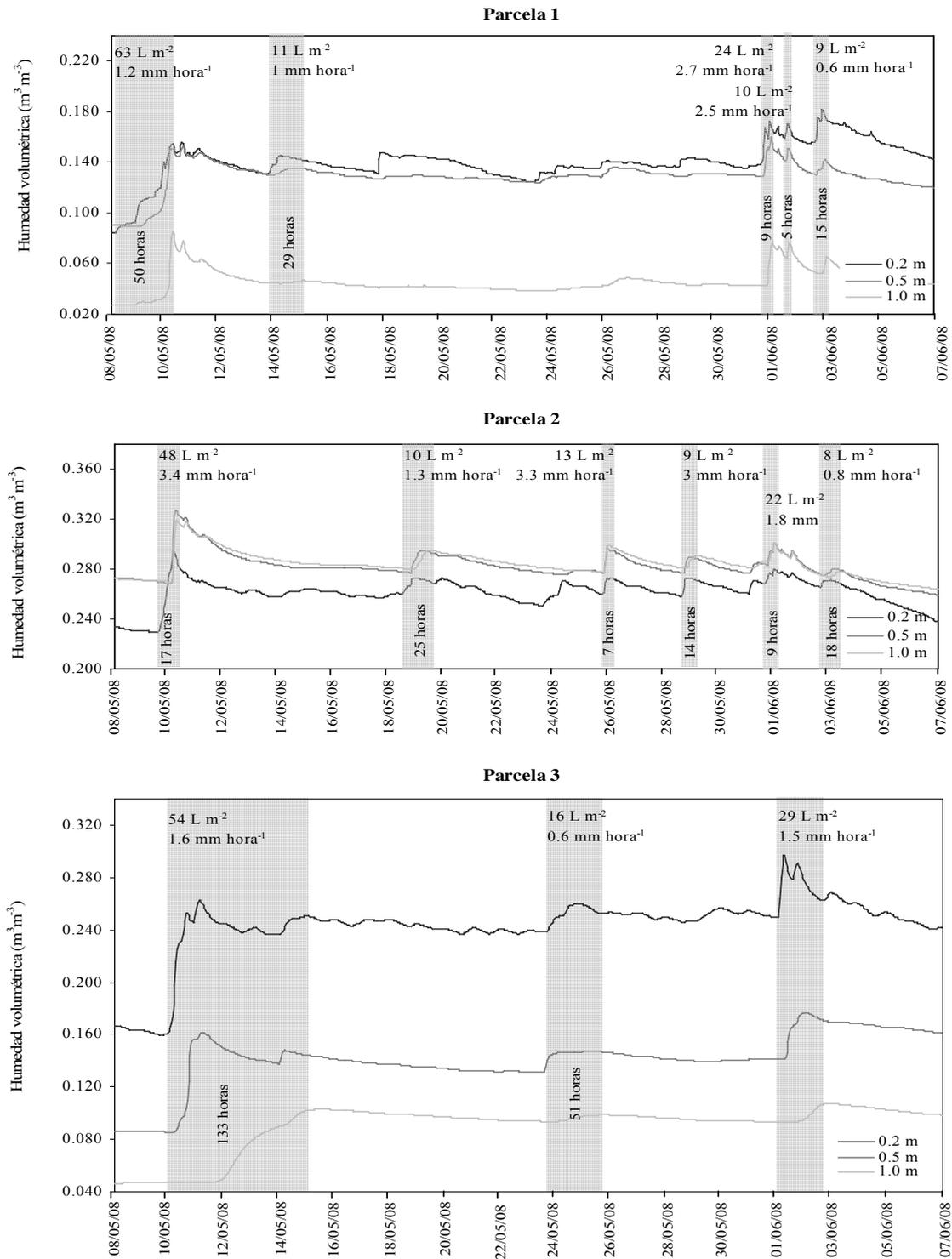


Figura 2. Humedad volumétrica en el suelo de las Parcelas 1, 2 y 3, a 0.2, 0.5 y 1.0 m de profundidad, para el periodo Mayo-Junio de 2008. Se indica el aporte total y la intensidad media de las entradas de agua, y el tiempo de desplazamiento del agua (en horas) desde su entrada en superficie hasta que alcanza el pico de humedad volumétrica más alto a 1.0 m de profundidad.