

TIPOS FUNCIONALES DE SUELO Y DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES EN LA ZNS EN EL PARQUE NACIONAL DE LAS TABLAS DE DAIMIEL

H. Aguilera, L. Moreno, E. Jiménez, S. Castaño y A. De la Losa

Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España).

e-mail: h.aguilera@igme.es, l.moreno@igme.es, e.jimenez@igme.es, s.castano@igme.es, a.delalosa@igme.es

Palabras clave: Antropización, Materia Orgánica, Nutrientes, Tablas de Daimiel, Zona no Saturada (ZNS)

RESUMEN. *La explotación excesiva del acuífero de la Mancha occidental provocó que desde la década de 1970, las descargas de éste en la zona de Las Tablas de Daimiel disminuyeran, hasta desaparecer por completo, dando lugar al progresivo desarrollo de una zona no saturada (ZNS) antes inexistente y la completa inversión del sentido del flujo hídrico, al transformarse las zonas de drenaje del acuífero en zonas de recarga. Para valorar el impacto de este proceso sobre la calidad del agua subterránea se aborda, en una primera aproximación, la cuantificación y distribución espacial de las concentraciones de nutrientes móviles almacenadas en la ZNS del vaso de las Tablas. Los resultados indican una acumulación de nutrientes en las capas más superficiales del suelo, preferentemente en zonas con alto contenido en materia orgánica procedente de la descomposición del carrizo, y también en los limos fluviales que rellenan los canales y zanjones de origen antrópico.*

ABSTRACT. *The intensive exploitation of the West La Mancha aquifer has caused a decrease in groundwater discharge in the Tablas de Daimiel area since the 1970's until they completely stopped. This fact has favoured the progressive development of an unsaturated zone, which did not exist before, and a full inversion in the water flux direction, as drainage zones of the aquifer became recharge areas. To assess the impact of this process on groundwater quality, a first approximation to the problem has been made through the quantification of the spatial distribution and concentrations of mobile nutrients stored in the unsaturated zone, which are readily leached to the saturated zone. The results point out the accumulation of these nutrients in the topsoil, mostly in areas with high organic matter content coming from reed decomposition, and in fluvial silts filling anthropic channels and ditches.*

1. INTRODUCCIÓN

El interés por la conservación de las zonas húmedas en el mundo ha experimentado un importante impulso, gracias, en parte, al reconocimiento de su alto valor ecológico y ambiental (Mitsch y Gosselink, 1993). Los humedales constituyen refugios extraordinarios para la biodiversidad, tanto animal como vegetal, y además desempeñan un papel indispensable en los ciclos hidrológico y biogeoquímico, regulando el caudal de los ríos y el destino de sedimentos y nutrientes (Phillips, 1989). Los humedales ligados a la dinámica hídrica subterránea muestran además una debilidad añadida al estar ligados a la evolución de los niveles piezométricos, dependientes a su vez de la correcta gestión de la explotación de los acuíferos.

El Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel (PNTD) se encuentra entre estos humedales ligados al agua subterránea. Con más de 150 km² de superficie (Álvarez-Cobelas et al. 2001), constituía la más extensa zona encharcada de un conjunto que forma la denominada Mancha Húmeda en la cuenca Alta del Guadiana. El régimen de encharcamiento era una mezcla de la estacionalidad de las entradas de agua por el río Cigüela, con aguas oligohalinas (Álvarez-Cobelas et al. 2000), y por el Guadiana, de aguas más dulces y carbonatadas de origen subterráneo. En invierno y primavera las entradas del Cigüela eran dominantes, mientras que en verano y principios de otoño predominaban las aportaciones subterráneas desde el río Guadiana (Castaño, 2003). La red de drenaje del entorno era residual y poco definida, siendo frecuentes los fenómenos de endorreísmo.

A partir de los años 1960 la acción del hombre empezó a romper el particular equilibrio que permitía la

existencia de las Tablas. Los drenajes artificiales, las canalizaciones de los cauces, la contaminación de la cuenca y, sobre todo, la explotación intensiva del acuífero de la Mancha occidental, iniciaron un proceso de desecación que ha modificado las características cuantitativas y cualitativas del humedal, con una notable pérdida y alteración de la biodiversidad. En la década de 1980 desaparecieron las salidas de aguas subterráneas y el nivel freático se situó bajo el fondo del vaso, provocando una serie de cambios radicales en el sistema hídrico del PNTD (Moreno et al. 2007):

- El flujo pasa de vertical ascendente (descarga) a vertical descendente (recarga), con lo que la tendencia es a la desaparición de las zonas de encharcamiento si no existen aportaciones adicionales de agua.
- Aparece una ZNS generalizada y permanente bajo Las Tablas, activándose procesos de lavado, oxidoreducción, descarbonatación, mineralización y aporte de solutos al nivel freático.
- Se modifica la composición química del sistema al desaparecer los aportes subterráneos del acuífero, producirse trasvases desde la cuenca del Tajo y recircular agua subterránea procedente de los bombeos que vierten en el vaso.

La actual desconexión hídrica entre el humedal y la zona saturada ha convertido a Las Tablas de Daimiel en una extensa zona de recarga del acuífero de la Mancha occidental donde las aguas que llegan tienden a infiltrarse rápidamente. Por tanto, aumenta el riesgo de desecación (agravado por el cambio climático) y aumenta el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

En este contexto parece inmediato preguntarse qué papel representa la ZNS como almacén y modulador del flujo de agua, nutrientes y contaminantes hacia la zona saturada. El objetivo de este trabajo es precisamente la caracterización del primer aspecto, esto es, la cantidad y distribución espacial de nutrientes móviles almacenados en la ZNS del vaso de Las Tablas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El PNTD está situado en la parte terminal de dos cuencas hidrológicas, una superficial, la cuenca Alta del Guadiana, con una extensión de 15.000 km², y otra subterránea, de más de 5.000 km², el acuífero de la Mancha occidental, en la confluencia de los ríos Cigüela y Guadiana, a unos 11 km al norte del núcleo urbano de Daimiel, provincia de Ciudad Real (Figura 1). Se encuentra al pie de los relieves paleozoicos de los Montes de Toledo, en el extremo occidental de la llanura Manchega, y su orientación es NE-SO. La superficie aproximada es de 20 km², de los cuales 17 son inundables (Sánchez-Carrillo et al. 2001), aunque Las Tablas han permanecido prácticamente secas desde 2004. El escaso gradiente altitudinal, con pendientes inferiores al 1%, conforma un paisaje plano en el que sólo destacan pequeños islotes emergentes constituidos por facies calco-margosas del plioceno superior y/o costras calcáreas, como son las islas del Pan o de Algeciras (García Rodríguez, 1996). El clima es mediterráneo seco continental, con precipitaciones y temperaturas media anuales de 412,6 mm y 14,3 °C, respectivamente.

El entorno geológico está formado por un basamento de cuarcitas y pizarras paleozoicas, sobre las que se apoyan, discordantes, arenas, fangos, arcillas, calizas, dolomías y margas pliocenas. La vegetación emergente está dominada por el carrizo (*Phragmites australis*) y, en menor medida, por la masiega (*Cladium mariscus*) y la enea (*Thypha domingensis*), y constituye un elemento clave en el funcionamiento del humedal, ya que interviene decisivamente en la distribución y el balance de agua, en la sedimentación y en el ciclo de nutrientes. Pero además el carrizo se ha convertido, tanto por su propia ecología como por el manejo antrópico del mismo (ej. siega), en un factor determinante que condiciona la estructura y propiedades físico-químicas de los suelos del Parque.

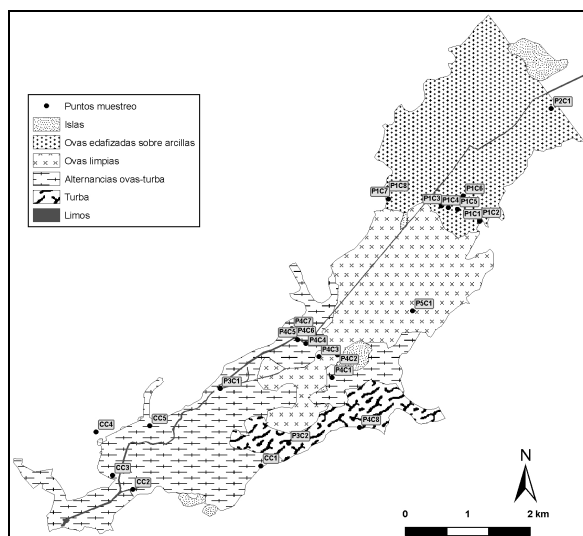


Figura 2. Localización de los puntos de muestreo y extensión de los distintos tipos funcionales de suelo definidos.

Para la toma de muestras se empleó una barrena manual Eijkelkamp modelo P1.01. Las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno y fueron desecadas al aire hasta su procesamiento. En laboratorio se realizaron las siguientes determinaciones sobre la matriz sólida: pH en suspensiones de suelo con agua y en disolución de cloruro potásico 1 M en proporciones peso/volumen de 1:2,5; carbono orgánico (método de Walkley-Black), nitrógeno orgánico y amoniacal total (método Kjeldahl) y fósforo extraíble con bicarbonato (método de Olsen). El porcentaje de carbono orgánico obtenido es posteriormente expresado en porcentaje de materia orgánica multiplicando por el factor de conversión 1,72, valor que se corresponde con un contenido promedio de carbono en la materia orgánica del 58% (Van Reeuwijk, 2002).

Por otra parte, se obtuvo el extracto acuoso (1:5) en el que se determinaron pH y conductividad eléctrica (electrometría), además de diversas especies inorgánicas solubles: potasio (espectrofotometría de emisión atómica), amonio, nitrato, nitrito y fosfato (espectrofotometría de absorción con autoanalizador de flujo continuo).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Nutrientes del extracto acuoso

En la Figura 3 se ha representado la distribución en profundidad de los nutrientes (formas inorgánicas), conductividad eléctrica (CE) y pH del extracto para el conjunto de las 121 muestras. La distribución del pH y la CE es relativamente homogénea, especialmente en el caso del pH, con un ligero aumento en profundidad y valores próximos a la neutralidad. Los valores de CE son muy elevados, entre 2000 y 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, similares a los medidos en las aguas subterráneas (datos no mostrados). El K^+ , el NO_3^- y el PO_4^{3-} se concentran en los primeros 40 cm del perfil, en la capa donde se produce la oxidación de la materia orgánica por microorganismos aerobios, con la consecuente liberación de nutrientes e incremento de la alteración mineral. Los valores de NO_3^- y K^+ en esta capa se pueden considerar como muy altos (Cobertera, 1993), no así los de PO_4^{3-} , que se mantienen a niveles muy bajos. Por el contrario, el NH_4^+ aumenta en profundidad al perder el medio capacidad oxidante.

La Tabla 1 resume las concentraciones de nutrientes del extracto en función del tipo de suelo en puntos de muestreo considerados representativos de cada tipo de material. La gran dispersión observada está ligada a la alta variabilidad y heterogeneidad del medio. El K^+ se encuentra asociado a los suelos salinos arcillosos y a los limos fluviales. En las ovas sucias o edafizadas se acumulan cantidades de formas móviles nitrogenadas muy superiores al resto de materiales, particularmente NO_3^- .

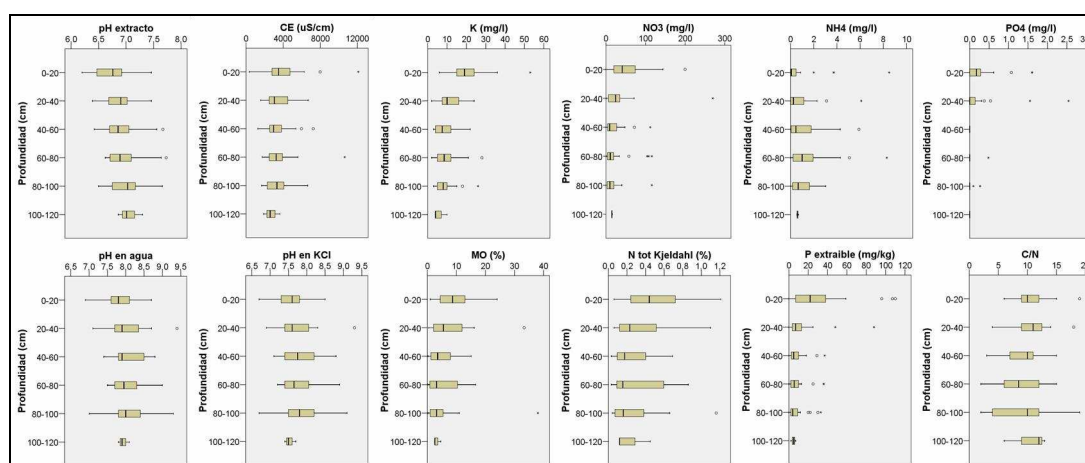


Figura 3. Distribución en profundidad de pH, conductividad eléctrica y nutrientes en los extractos acuosos de las 121 muestras (arriba), y de pH (en agua y KCl), materia orgánica (MO), nitrógeno total, fósforo extraíble y relación C/N en la matriz del suelo de las mismas muestras (abajo).

Tabla 1. Valores centrales y de dispersión de nutrientes del extracto en 5 puntos de muestreo representativos de cada material del suelo (Me: mediana; μ : media; SD: desviación estándar).

Punto	Material	CE (μ S/cm)			K ⁺ (mg/l)			NH ₄ ⁺ (mg/l)			NO ₃ ⁻ (mg/l)			PO ₄ ³⁻ (mg/l)		
		Me	μ	SD	Me	μ	SD	Me	μ	SD	Me	μ	SD	Me	μ	SD
P2C1	Arcillas	5970	6926	2984	21	26,2	15,1	0,3	0,6	0,8	18	31,4	32,3	0	0,1	0,1
P1C5	Ovas sucias	2650	2597	400	4,5	4,8	2,8	3,3	3,6	3,6	71	74,0	56,1	0	0,5	0,8
P4C3	Ovas limpias	2330	2211	276	7	8,2	3,8	1,7	1,3	0,8	17	25,4	21,7	0	0,0	0,1
P4C8	Turba	2230	2026	695	3	9,0	9,5	0,1	0,1	0,2	8	14,4	11,8	0	0,3	0,5
P3C1	Limos	3430	3694	744	17	20,4	8,9	1,8	1,8	1,8	7	13,6	11,1	0	0,0	0,1

En lo que se refiere a su distribución espacial en el PNTD, los nutrientes móviles tienden a acumularse en la zona central y nororiental del Parque (Figura 4). En el mapa se representa la mediana de las distribuciones de la suma de concentraciones de formas nitrogenadas, fósforo y potasio del extracto. Para presentar los resultados de este estudio se utiliza la mediana en lugar de la media aritmética por considerarse una medida de centralización menos sesgada a la hora de describir conjuntos de datos que presentan alta variabilidad. Tal y como sugerían los datos presentados en la Tabla 1, se trata de perfiles donde en general dominan las ovas edafizadas, lo que parece conferir a este material una gran capacidad de retención.

3.2. Matriz sólida

El pH en la suspensión acuosa también es bastante homogéneo en profundidad, pero con un carácter algo más básico que en el extracto (Figura 3). El pH en KCl se determinó como indicador de la acidez potencial del suelo, pero su distribución y valores son muy similares al anterior, debido, posiblemente, al efecto tampón ejercido por las elevadas cantidades de carbonato presentes (datos no mostrados). El contenido en MO es particularmente elevado (0,99% - 24,05%) en los primeros 20 cm, donde también se acumulan cantidades significativas de fósforo extraíble o asimilable (hasta 110 mg/kg) y nitrógeno total (0,06% - 1,21%), con valores considerados como “muy altos” en Cobertera (1993). Mientras el fósforo desaparece en profundidad, la materia orgánica y el nitrógeno total orgánico y amoniacal asociado se mantienen, presentando además una gran dispersión hacia valores elevados. La relación entre el carbono orgánico y el nitrógeno (C/N) se mantiene, en general, en valores entre 6 y 12, indicando una ligera tendencia hacia la mineralización.

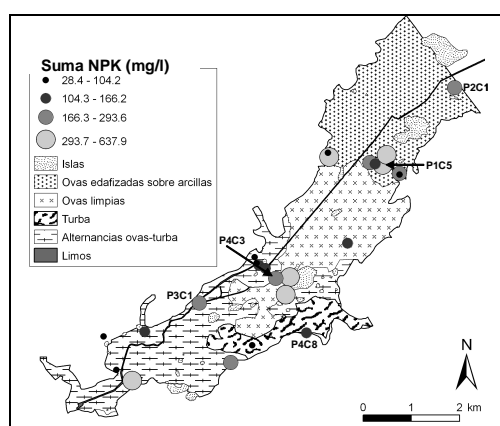


Figura 4. Distribución espacial de la agrupación por cuartiles de la mediana de las distribuciones de la suma de nutrientes (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} y K^+) en profundidad en los extractos de los perfiles muestreados.

La Tabla 2 muestra los contenidos en MO, N y P del suelo en los cinco perfiles representativos de cada tipo de material. La turba, las ovas edafizadas y los limos presentan las mayores cantidades de MO y lógicamente también de N orgánico. Las arcillas y las ovas limpias presentan valores inferiores, especialmente las primeras. Llama la atención la importante acumulación de P extraíble en los limos, casi cinco veces superior al contenido medio en el perfil turboso. Este hecho señala a los limos fluviales como otro tipo funcional acumulador de MO y nutrientes.

Tabla 2. Valores centrales y de dispersión de MO y nutrientes del suelo en 5 puntos de muestreo representativos de cada tipo de material (Me: mediana; μ : media; SD: desviación estándar).

Punto	Material	% MO			% N tot Kjeldahl			P (mg/kg)		
		Me	μ	SD	Me	μ	SD	Me	μ	SD
P2C1	Arcillas	1,0	1,7	1,7	0,1	0,1	0,1	2,0	2,8	2,7
P1C5	Ovas sucias	7,1	9,7	7,6	0,4	0,4	0,3	7,2	7,2	3,1
P4C3	Ovas limpias	3,3	4,2	2,2	0,2	0,2	0,1	6,5	8,2	3,3
P4C8	Turba	5,8	8,8	5,9	0,4	0,5	0,3	8,8	13,2	9,1
P3C1	Limos	9,7	10,3	1,3	0,5	0,4	0,1	37,1	60,4	34,8

La distribución espacial de la MO, y por tanto también del N orgánico, está en consonancia con los datos de la Tabla 2, ya que los valores más altos se presentan en la parte central y final del PNTD (Figura 5), es decir, en zonas de ovas y turba, y en los limos de los canales. También aparece en cantidades significativas en las zonas de ovas edafizadas del norte del Parque. Todas ellas son áreas con abundante desarrollo vegetal, principalmente carrizales. De esta forma parece corroborarse que esta planta perenne rizomatosa, con una biomasa subterránea del mismo orden e incluso superior a la superficial, y con una tasa de renovación anual, constituye actualmente una de las principales fuentes de MO y nutrientes al medio a través de la descomposición y mineralización de los restos vegetales (Sánchez-Carrillo y Álvarez-Cobelas, 2001). De hecho, Sánchez-Carrillo et al. (2001), en su estudio sobre la sedimentación en el PNTD, encuentran una asociación lineal entre cobertura de carrizo y tasa de sedimentación de MO con un R^2 de 0.78 ($p < 0.004$). Estos autores sugieren una rápida mineralización superficial de la MO, más que la precipitación de sólidos en suspensión, como principal mecanismo de acumulación de C, N y P inorgánicos.

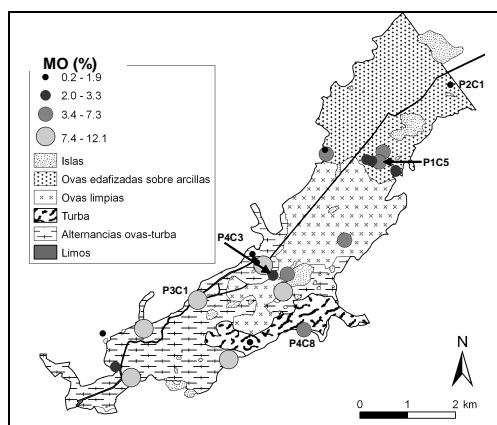


Figura 5. Distribución espacial de la agrupación por cuartiles de la mediana de las distribuciones del porcentaje de materia orgánica en profundidad en los perfiles muestreados.

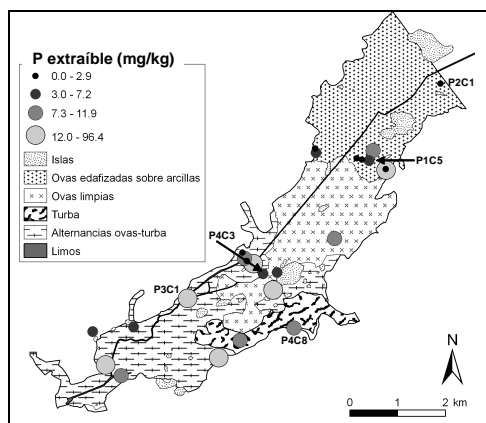


Figura 6. Distribución espacial de la agrupación por cuartiles de la mediana de las distribuciones de fósforo extraíble en profundidad en los perfiles muestreados.

Por otra parte, la enorme acumulación superficial de P extraíble queda enmascarada en el mapa de la Figura 6 por la centralización de valores de todo el perfil, excepto en el punto P1C1 (96 mg/kg de suelo), situado en una zona cultivada sobre materiales terciarios, que sólo cuenta con una única observación. Otros perfiles con altas cantidades de P extraíble en superficie son el limoso P3C1 (107 mg/kg), y los situados en zonas de alternancias de ovas y turba P4C1 (47 mg/kg), P4C4 (59 mg/kg) y CC3 (110 mg/kg). Algunos de ellos no presentan grandes cantidades de MO y son a su vez puntos relacionados con zonas de inundación o cauces superficiales. Sánchez-Carrillo et al. (2001) estipulaban la dominancia del P de origen autóctono sobre el total sedimentado, pero también argumentaban la dominancia del material mineral sobre el orgánico en la sedimentación alóctona por vía superficial. En los datos aquí presentados, tanto de nutrientes extractables como de P extraíble, se observa una cierta asociación espacial con la red de drenaje superficial (Figura 1), lo que parece indicar que la inundación ocasional, generalmente a través del trasvase Tajo-Segura o de avenidas puntuales, puede constituir también una fuente de nutrientes al suelo. No hay que olvidar que el PNTD se encuentra situado al final de toda la cuenca Alta del Guadiana, donde existe una actividad agrícola considerable y, por tanto, aunque la red fluvial sea inactiva, puntualmente no lo es, recibiendo el Parque parte de lo que se lave en el sistema y de lo que se vierta en los cauces. Esto explicaría, en parte, los altos niveles observados en los limos fluviales. A pesar de ello, la decreciente frecuencia en los episodios de inundación de las Tablas augura poco peso a esta fuente de nutrientes

en el futuro. Por último, parece conveniente destacar en este punto lo observado por Koerselman et al. (1993): las aguas superficiales de mala calidad, como lo suelen ser las que fluyen esporádicamente por el PNTD, favorecen la liberación y movilización de nutrientes (N y P) retenidos en suelos turbosos, especialmente de P, con el consiguiente riesgo de lavado hacia el nivel freático, a través de la zona no saturada.

4. CONCLUSIONES

Las elevadas concentraciones de nutrientes móviles medidas en los primeros 40 cm de los perfiles muestreados, sugieren la existencia de un proceso activo de liberación y acumulación de nutrientes. Los análisis indican que estos nutrientes se encuentran retenidos en zonas superficiales donde dominan las ovas edafizadas y proceden, principalmente, de la descomposición del carrizo. También se constata su acumulación en los zanjones y canales de origen antrópico, rellenos por limos fluviales con abundante materia orgánica.

El porcentaje de materia orgánica es muy elevado tanto en superficie como en profundidad, especialmente en la zona central y meridional del Parque. Existe, por tanto, un elevado riesgo de movilización de nutrientes hacia la zona saturada, ya que en muchas zonas el nivel freático es bastante somero, situándose a tan sólo 80 o 100 cm de profundidad. Este proceso se vería favorecido además por la infiltración de aguas de mala calidad como lo son, por ejemplo, el efluente de la depuradora de aguas residuales de Villarrubia de los Ojos que se vierte al zanjón del Cigüela a escasos 6 km del límite norte del PNTD, o las procedentes de la recirculación de aguas subterráneas, de carácter salino, que se vierten directamente sobre el vaso de Las Tablas para mantener una superficie mínima encharcada.

Agradecimientos. El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro del proyecto CICYT CGL2005-06458-C02-01. Los autores quieren agradecer la colaboración y el apoyo prestado por los gestores y guardas del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. Fundamental ha sido también la ayuda material y logística aportada por el personal del Departamento de Edafología de la Universidad Complutense.

REFERENCIAS

- Aguilera, H., L. Moreno, S. Castaño, E. Jiménez, y A. De la Losa, 2009. Contenido y distribución espacial de nutrientes móviles en la zona no saturada en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. *Boletín Geológico y Minero de España*. Aceptado para publicación.
- Álvarez-Cobelas, M., S. Cirujano, y S. Sánchez-Carrillo, 2001. Hydrological and botanical man-made changes in the Spanish wetland of Las Tablas de Daimiel. *Biological Conservation*. 97, 89-98.
- Álvarez-Cobelas, M., M. Moreno, E. Ortega Bernaldo de Quirós, S. Cirujano, M.A. Rodrigo, L. Medina, S. Sánchez, C. Rojo, P. Riobobos, y D.G. Angeler, 2000. Las Tablas de Daimiel: avatares de un humedal europeo. *Quercus*. 178, 16-25.
- Castaño, S., 2003. *Estudio metodológico para el cálculo de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel: validación de resultados*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 112 pp. (<http://www.ucm.es/eprints/5263/>).
- Cobertera, E., 1993. *Edafología aplicada*. Cátedra, Madrid, 328 pp.
- Domínguez-Castro, F., J.I. Santisteban, R. Mediavilla, W.E. Dean, E. López-Pamo, M.J. Gil-García, y M.B. Ruiz-Zapata, 2006. Environmental and geochemical record of human-induced changes in C storage during the last millennium in a temperate wetland (Las Tablas de Daimiel National Park, central Spain). *Tellus*. 58, 573-585.
- García Rodríguez, M., 1996. *Hidrogeología de las Tablas de Daimiel y de los ojos del Guadiana. Bases hidrogeológicas para una clasificación funcional de humedales ribereños*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 437 pp.
- García-Hidalgo, J.F., J. Temiño, I. de Bustamante, y M. Segura, 1995. Evolución sedimentaria reciente de las Tablas de Daimiel (Ciudad Real). *Geogaceta*. 18, 87-89.
- Koerselman, W., M. Van Kerkhoven, y J. Verhoeven, 1993. Release of inorganic N, P and K in peat soils; effect of temperature, water chemistry and water level. *Biogeochemistry*. 20, 63-81.
- Mitsch, W.J. y J.G. Gosselink, 1993. *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold, New York, 722 pp.
- Moreno, L., S. Castaño, E. Jiménez, H. Aguilera, y A. De la Losa, 2007. Control del efecto de la inversión del flujo vertical (descarga a recarga) sobre la composición química del agua subterránea en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel. Resúmenes del I Congreso Nacional sobre Cambio Global, Getafe, pág. 30.
- Phillips, J.D., 1989. Fluvial sediment storage in wetlands. *Water Resources Bulletin*. 25, 867-873.
- Sánchez-Carrillo, S., y M. Álvarez-Cobelas, 2001. Nutrient dynamics and eutrophication patterns in a semi-arid wetland: the effects of fluctuating hydrology. *Water Air and Soil Pollution*. 131, 97-118.
- Sánchez-Carrillo, S., M. Álvarez-Cobelas, y D.G. Angeler, 2001. Sedimentation in the semi-arid freshwater wetland Las Tablas de Daimiel (Spain). *Wetlands*. 21, 112-124.
- Van Reeuwijk, L.P., 2002. *Procedures for Soil Analysis*. ISRIC (Internacional Soil Reference and Information Centre), 6ª Edición, 120pp.