

EFICIENCIA AGRONÓMICA DE TRES FUENTES FOSFATADAS EN CÉSPED EN CONDICIONES CONTROLADAS

E. AFIF KHOURI Y J.A. OLIVEIRA PRENDES

Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Escuela Universitaria de Ingenierías Técnicas. Universidad de Oviedo.

Calle Gonzalo Gutiérrez de Quirós s/n. 33600 Mieres (España). elias@uniovi.es

RESUMEN

Se han seleccionado 12 suelos con carácter muy ácido, ácido y neutro de la zona occidental, central y oriental respectivamente del Principado de Asturias, para evaluar el efecto de tres fuentes fosfatadas en la producción de biomasa seca y absorción de P de una mezcla de césped comercial de uso recreativo, cultivada en macetas en invernadero. Los tratamientos fueron cuatro: el primero con suelo sin fertilizar y en los otros tres se aplicó a cada uno una dosis de 200 mg P kg⁻¹ de diferente procedencia: fosfato diamónico (DAP, 18% N, 46% P₂O₅), abono complejo PK (20% P₂O₅, 5% K₂O) y abono simple superfosfato de cal (SF, 18% P₂O₅). La mayor absorción de P y producción de biomasa seca en todos los suelos se produjo con el uso de DAP. En todas las zonas el SF presentó una mayor concentración de P asimilable en el suelo que el complejo PK. El SF, también presentó una mayor cantidad de P absorbido excepto en los suelos ácidos de la zona central. En esta zona, el SF presentó una mayor disolución de fósforo que no fue aprovechado por el césped debido a la alta capacidad de estos suelos para fijar el P.

Palabras clave: Análisis de suelo, análisis de planta, fósforo asimilable, fosfato diamónico.

INTRODUCCIÓN

La cantidad total de fósforo presente en la capa cultivable de los suelos oscila, normalmente, entre 200 y 5000 mg P kg⁻¹ (Lindsay, 1979). Esta cantidad sería, en principio, más que suficiente para abastecer de fósforo cualquier cultivo. Desafortunadamente, sólo una parte muy pequeña de la misma, normalmente menos del 1%, está disponible para la planta. Procesos como el de desorción, solubilización o mineralización ponen a disposición de la planta diversas formas de fósforo.

En la disolución del suelo el fósforo está presente en gran parte como ión ortofosfato, muy frecuentemente del orden de 0,1 mg P L⁻¹ (Thompson y Troeh, 2008), de donde la

planta lo puede extraer directamente. El pH más favorable para la disponibilidad del fósforo se encuentra ligeramente por debajo de la neutralidad (pH 6 - 6,5). Los complejos solubles formados por los iones fosfato con distintos cationes di y trivalentes tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , etc., que suelen estar presentes en la disolución del suelo, pueden llegar a ser una fracción importante del ión ortofosfato en disolución (Afif, 2005). También los complejos solubles de fósforo orgánico forman una parte del fósforo total en la disolución (Turrión *et al.*, 2000).

Cuando la concentración de fosfato en la disolución del suelo es baja, normalmente en el intervalo micro a milimolar (Mendoza y Barrow, 1987; Nychas y Kosmas, 1984), dominan las reacciones de adsorción y cuando dicha concentración es alta, la precipitación es el mecanismo que puede tener lugar (Lin *et al.*, 1983).

El proceso de adsorción de fosfato es una propiedad importante del suelo, ya que los iones H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} en la disolución reaccionan con la superficie de los constituyentes del suelo tales como los minerales de la arcilla, sesquióxidos de hierro y aluminio y calcita, afectando la disponibilidad del fosfato para las plantas (Lajtha y Bloomer, 1988; Peña y Torrent, 1990; Walbridge *et al.*, 1991; Afif *et al.*, 1993; Dolfig *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2001; Carreira *et al.*, 2006). Gracias a los procesos de liberación, el fosfato adsorbido pasa a la disolución del suelo de donde es disponible a las plantas. Turrión *et al.* (2007) indicaron que el fosfato débilmente adsorbido sobre los coloides arcillosos es más asimilable por las plantas que el resto de las reservas edáficas. Por otra parte, existe evidencia de la capacidad de la materia orgánica para adsorber fosfato, pero ello sólo parece ser posible cuando hay Al y Fe adsorbidos, por el mecanismo de intercambio de ligando del ión fosfato por los grupos OH (White, 1980). Sin embargo, diferentes estudios muestran que la materia orgánica puede disminuir la adsorción de fosfato debido a que los ácidos orgánicos se adsorben por intercambio de ligando y compiten con los lugares de adsorción del fosfato en la superficie de los minerales (Sample *et al.*, 1980; Afif *et al.*, 1995).

La mayoría de los laboratorios de análisis de suelo emplean el método de Olsen (Olsen y Sommers, 1982) desarrollado originalmente para suelos calcáreos, como método oficial de determinación de fósforo asimilable (Buondonno *et al.*, 1992). Los métodos Bray 1 y Bray 2 (Jackson, 1964) se utilizan a menudo en la determinación de fósforo asimilable en suelos ácidos (Holford, 1997). Los extractantes multi-elemento, también llamados extractantes universales, capaces de extraer simultáneamente un elevado número de macro- y micronutrientes, son utilizados de forma creciente en los últimos años (Raij, 1994; Afif y Oliveira, 2005). Su principal ventaja es un considerable ahorro de tiempo y de dinero en la realización de los análisis. Entre los extractantes universales destaca el reactivo Mehlich 3 (Mehlich, 1985) ampliamente usado en Estados Unidos y Canadá, si bien su uso es poco habitual en los países europeos (Buondonno *et al.*, 1992). De todos los métodos anteriores, el Mehlich 3 altamente correlacionado con la extracción de fós-

foro por la planta y con el rendimiento vegetal, parece el más adecuado para la estimación de fósforo asimilable en una amplia gama de suelos, ya que los de Bray 2 y Olsen parecen sobreestimar el fósforo asimilable en suelos ricos en componentes no cristalinos (Fernández, 1997; Monterroso *et al.*, 1999; Afif y Oliveira, 2005). En líneas generales, cuando los niveles de fósforo edáfico extraíble por el método de Mehlich 3 son menores de 15 mg P kg⁻¹ de suelo es posible encontrar una respuesta a la fertilización fosfatada, entre 15 y 30 mg P kg⁻¹ es probable y por encima de 30 mg P kg⁻¹ no se debe esperar respuesta a la fertilización (Mehlich, 1985; Buondonno *et al.*, 1992; Cox, 1996).

La cantidad de fósforo absorbido por las raíces, y desde allí distribuido a todas las células de la planta, es variable. La mayor parte de los cultivos utilizan entre 1 y 3 mg P g⁻¹ materia seca. Se ha considerado 2 mg P g⁻¹ materia seca como concentración crítica de fósforo en las plantas al 90% del rendimiento máximo, por debajo de la cual se espera una condición de deficiencia con respecto al crecimiento de la planta (Kamprath y Watson, 1980). Sin embargo, Adams y Gibbs (1994) observaron valores de concentración de fósforo en el tejido de una amplia variedad de céspedes entre 2 y 5 mg P g⁻¹ materia seca. Existen claras evidencias que factores internos de las plantas (edad, especie, variedad, status nutricional, etc.) como externos (pH, capacidad tampón, estado energético del agua del suelo, concentración de Ca, Mg y P en la disolución del suelo) pueden influenciar la absorción del fósforo (Jungk, 1987). Uno de los factores externos que influye fuertemente en la absorción de fósforo por la planta es la fuente de N empleada en la fertilización. Marschner *et al.* (1986) y Tagliavini *et al.* (1995) indicaron que la fertilización nitrogenada a base de NH₄⁺ ocasiona una excreción excesiva de protones (H⁺) por las raíces de la planta, llamada acidez fisiológica, proceso que favorece la disolución de fuentes de fósforo poco solubles. Cuando la fertilización nitrogenada es a base de NO₃⁻ la planta excreta HCO₃⁻, elevando el pH de la rizósfera. La acidez fisiológica es un mecanismo de la planta para mantener la electroneutralidad de la interfase suelo-raíz como consecuencia de un desbalance en la relación cation/anión absorbidos por las raíces. Otro factor externo importante que afecta la absorción de fósforo por las plantas, es la humedad del suelo. Gahoonia *et al.* (1994) señalaron que en suelos con baja humedad se reduce la disponibilidad espacial del fósforo en el suelo cerca de las raíces, debido a que se restringe el proceso de difusión del fósforo soluble en la zona de la rizósfera.

La fuente más importante dentro de los minerales primarios de fósforo en los suelos, es el mineral apatito (fosfato de calcio), en sus formas de cloroapatito, fluoroapatito e hidroxiapatito (Ca₅(PO₄)₃ Cl, F, OH). Por la relativa insolubilidad de este mineral primario y su forma de presentarse, no se puede considerar como una fuente directa para las plantas (Norrish y Rosser, 1983). Ramírez *et al.* (2001), entre otros, han utilizado el superfosfato triple (formado en su mayoría de fósforo soluble en agua) como fertilizante de referencia en la evaluación agronómica de diferentes fuentes fosfatadas, debido a la alta disponibilidad del fósforo aportado por este fertilizante.

El objetivo de este trabajo es evaluar la respuesta de un césped cultivado en macetas a la aplicación de tres fuentes fosfatadas, a corto plazo (primer corte), en relación con las propiedades de 12 suelos desarrollados sobre distinto material parental de la zona oriental, central y occidental del principado de Asturias, específicamente en cuanto a la producción de biomasa seca y absorción de fósforo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Toma de muestra y análisis de suelo

Para la realización de este trabajo se tomaron muestras de suelos en 12 lugares de prados del Principado de Asturias: cuatro muestras del occidente Asturiano (en los concejos de Valdés, Allande, Boal y Grandas de Salime), cuatro de la zona central (Ribera de Arriba, Gozón, Avilés y Langreo) y cuatro de la zona oriental (Piloña, Amieva, Llanes y Cabrales). La Figura 1 muestra la localización de las 12 muestras seleccionadas. Los suelos se clasificaron como Ustorthent, Ustochrept, Udorthent and Dystrochrept en la zona occidental y central y Udorthent, Eutrudept y Dystrudept en la zona oriental (Soil Survey Staff, 1999), desarrollados sobre distinto material parental: areniscas, cuarcitas apizarradas y pizarras en el occidente; calizas y depósitos fluviales en la zona central y calizas blancas, conglomerados y cuarcitas en el oriente (IGME, 2001).

En cada localidad se tomó una muestra de 5 kg de suelo compuesta por la homogeneización de 20 submuestras tomadas al azar a 0-20 cm de profundidad con la ayuda de una sonda holandesa. El suelo recogido en ningún caso había sido abonado recientemente con fosfato. Las muestras de suelo se secaron al aire a temperatura ambiente, se desmenuzaron y se hicieron pasar por un tamiz de 2 mm de luz de malla circular para quitar los elementos gruesos. Una pequeña parte de la tierra fina se utilizó para los análisis físico-químicos. Se determinó la textura según el método de la pipeta Robinson usando hexametáfosfato sódico con Na_2CO_3 como dispersante. Para hallar la capacidad de campo (CC) se utilizaron embudos cilíndricos tapados con algodón por la base, llenándolos con muestras de suelo y añadiendo el agua suficiente para humedecer, transcurrido 48 h, tres cuartas parte del suelo. Finalmente se tomó una muestra de la zona central de la parte húmeda y se determinó la humedad (Afif, 2005). El carbono orgánico se determinó por ignición; el pH potenciométricamente en una suspensión suelo:agua 1:2,5; las sales solubles en el extracto 1:5; las bases extraíbles con CINH_4 1 N y Al intercambiable con KCl 1M, ambos por absorción atómica y, a continuación, se calculó la capacidad de intercambio catiónico efectiva (bases + aluminio de cambio); el nitrógeno total por el método Kjeldahl (Klute, 1996) y el fósforo disponible se determinó por el método de Mehlich 3 (Mehlich, 1985), por ser el más adecuado para la estimación de fósforo asimilable en una amplia gama de suelos (Monterroso *et al.*, 1999; Afif y Oliveira, 2005). En la Tabla 1 se muestran las propiedades de los suelos analizadas.

TABLA 1
Propiedades generales de los suelos.
General soil properties.

Zona	Localidad	pH ¹	CE ²	CC ³	Are. ⁴	Arc. ⁵	MO ⁶	N	C/N	MP3 ⁷	Ca ⁸	Mg ⁸	K ⁸	Na ⁸	Al ⁸	CICE ⁹
			ds m ⁻¹			%					mg kg ⁻¹			cmol (+) kg ⁻¹		
Occidente	Pola de Allande	4,66	0,035	16,57	80,68	3,22	3,36	0,26	7,45	29,07	1,349	0,219	0,069	0,506	1,921	4,064
	Grandas de Salime	4,17	0,035	22,02	82,94	11,37	3,69	0,38	5,71	25,81	0,961	0,062	0,041	0,466	2,473	4,003
	Valdés	4,81	0,037	15,98	91,06	5,96	2,50	0,15	9,62	30,29	1,526	0,129	0,089	0,548	2,457	4,749
	Boal	4,17	0,046	18,76	69,09	8,83	4,40	0,38	6,79	29,88	1,062	0,085	0,051	0,539	1,367	3,105
Centro	Ribera de Arriba	5,46	0,029	21,64	54,40	9,77	4,16	0,32	7,68	25,74	4,247	0,229	0,071	0,664	0	5,211
	Gozón	5,59	0,059	22,99	46,92	10,27	2,96	0,18	9,56	20,80	4,917	0,472	0,127	0,565	0	6,081
	Carreño	5,77	0,144	33,64	36,44	22,70	2,88	0,17	10,02	32,14	6,859	0,297	0,142	0,803	0	8,101
	Langreo	5,45	0,090	20,75	12,42	9,50	4,66	0,46	5,85	34,83	4,286	0,310	0,134	0,644	0	5,374
Oriente	Piloña	6,48	0,213	27,95	67,62	17,99	2,70	0,16	9,87	28,18	9,136	0,361	0,142	0,726	0	10,365
	Cabrales	6,62	0,153	35,82	58,18	23,23	4,67	0,36	7,61	24,28	9,615	0,461	0,267	0,695	0	11,037
	Amieva	6,70	0,228	18,82	72,63	9,12	3,65	0,23	9,07	35,80	12,425	0,951	0,184	0,518	0	14,078
	LLanes	6,82	0,163	25,71	67,58	18,01	2,60	0,15	9,88	26,31	15,172	0,789	0,136	0,539	0	16,636

¹pH (H₂O) relación suelo:disolución (1:2,5); ²Conductividad eléctrica en el extracto (1:5) medida a 25 °C; ³Capacidad de campo; ⁴Arena; ⁵Arcilla; ⁶Materia orgánica; ⁷P disponible extraído por el método de Mehlich 3; ⁸Ca, Mg, K, Na y Al intercambiables; ⁹Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.

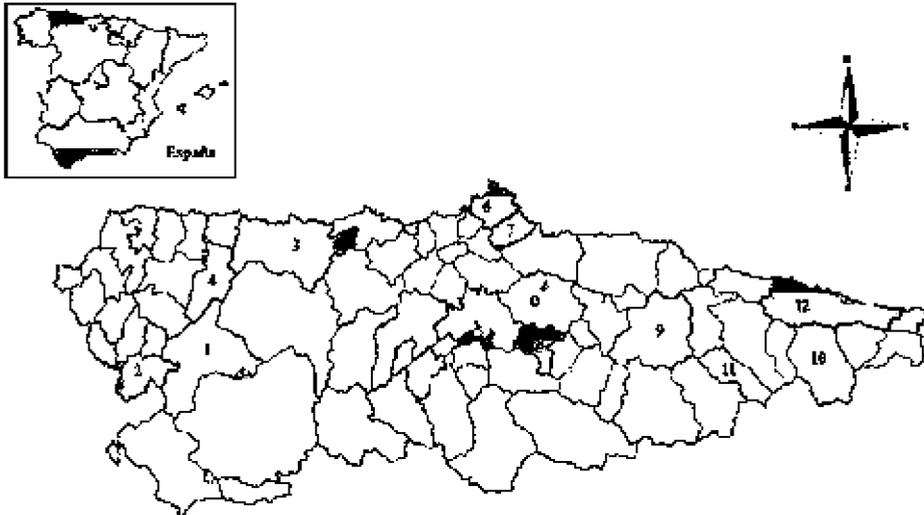


FIGURA 1

Localización de las muestras de suelo en Asturias: 1 Allande; 2 Grandas de Salime; 3 Valdés; 4 Boal; 5 Ribera de Arriba; 6 Gozón; 7 Carreño; 8 Langreo; 9 Piloña; 10 Cabrales; 11 Amieva; 12 Llanes.

Localization of the soil samples in Asturias. 1 Allande; 2 Grandas de Salime; 3 Valdés; 4 Boal; 5 Ribera de Arriba; 6 Gozón; 7 Carreño; 8 Langreo; 9 Piloña; 10 Cabrales; 11 Amieva; 12 Llanes.

Experimento de eficiencia agronómica en invernadero

El experimento de eficiencia agronómica de fósforo se hizo en macetas de 0,5 L de capacidad en invernadero a 13 ± 2 °C de temperatura, conteniendo cada maceta 500 g de suelo con dos repeticiones para cada tratamiento. Los tratamientos fueron cuatro: el primero con suelo sin fertilizar y en los otros tres se aplicó una única dosis de 200 mg P kg⁻¹ procedente de tres fuentes fosfatadas. Se utilizaron como fertilizantes fosfatados dos abonos complejos y un abono simple: abono complejo NP 18-46 (fosfato diamónico DAP 18% N, 46% P₂O₅); abono complejo PK 20-5 (20% P₂O₅, 5% K₂O) y abono simple superfosfato de cal 18% P₂O₅. Los fertilizantes fueron adquiridos en la empresa CEFSA, S.A. y aplicados a los suelos en su granulometría original de forma homogénea (usando bolsas de plástico para mezclar el suelo con el fertilizante).

En cada maceta se colocaron 1,92 g de una mezcla de semillas de césped recreativo denominada "Senasa Jardín" y que comprende: *Lolium perenne* cv Nui 55%; *Festuca rubra* cv Mystic 35%; *Poa pratense* cv Balin 5% y *Agrostis tenuis* cv Highland 5%. Se calculó la cantidad de la mezcla de semillas a añadir en cada maceta a partir de la

superficie de la maceta ($0,0064 \text{ m}^2$) y la dosis de siembra comercialmente recomendada (30 g m^{-2}). Para conseguir un mayor desarrollo de las plantas se aplicó en todas las macetas incluido el testigo 150 mg N kg^{-1} (75 mg N por maceta) utilizando nitrato amónico cálcico ($27\% \text{ N}$), restando el porcentaje de N en el tratamiento con DAP. Después de un periodo experimental de 45 días, agregando diariamente la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de campo, se cortaron las plantas a ras del suelo, transfiriendo el material vegetal fresco a una estufa a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 h para determinar el peso seco del material vegetal. De los suelos de cada maceta, después del cultivo, una vez secos al aire libre, se eliminaron las raíces para determinar el fósforo Mehlich 3.

Análisis foliar y cálculo de variables relacionadas con el rendimiento

El análisis mineral de los céspedes se realizó tras la molienda del material vegetal seco con una extracción húmeda utilizando ácido perclórico y ácido nítrico (Jones *et al.*, 1991), y diluyéndose a continuación con HCl 1N. A partir de esta dilución se determinaron el Ca, Mg y K por absorción atómica y el P fotométricamente. El N se determinó por el método Kjeldahl tras la mineralización de las muestras vegetales con ácido sulfúrico concentrado a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 1 h.

Con los datos obtenidos se calcularon los valores del índice de eficiencia agronómica (ÍEA) y la disolución aparente (DA). El ÍEA expresado en porcentaje, muestra el comportamiento de los rendimientos obtenidos con los productos ensayados respecto a un producto de referencia de mayor disponibilidad utilizado en el experimento (en este trabajo dicho producto corresponde al fosfato diamónico), de acuerdo con la fórmula (Büll *et al.*, 1997):

$$\text{ÍEA} = \frac{\text{producción con cada fuente fosfatada} - \text{producción sin fosfato}}{\text{producción con fosfato diamónico} - \text{producción sin fosfato}} \times 100$$

La DA es un parámetro que permite visualizar la cantidad de fósforo que se disuelve de cada fertilizante (Ramírez *et al.*, 2001). El cálculo de la DA se realizó de la siguiente forma: $DA = PD + PA$ donde PD es el fósforo Mehlich 3 total disponible en cada maceta que incluye el contenido en el suelo sin fertilizar más el proveniente del fertilizante; PA es el fósforo absorbido por las plantas en cada maceta (mg P planta^{-1}) y se obtiene multiplicando la producción en materia seca (mg) por la concentración de fósforo en la planta (mg P g^{-1}).

Análisis estadístico de los datos

Para el tratamiento de los datos se aplicó en primer lugar una estadística descriptiva. Para comparar el efecto de las fuentes fosfatadas, tipo de suelo y las interacciones tratamiento-suelo sobre las variables evaluadas, se utilizó el análisis de la varianza ANOVA. En los casos de diferencias significativas se aplicó el test de Tukey ($p < 0,05$). También se llevó a cabo un análisis de correlación lineal a través del coeficiente de correlación de Pearson para analizar las relaciones entre aquellas variables determinadas analíticamente y directamente relacionadas con el rendimiento.

El tratamiento estadístico de los datos se realizó mediante el programa SPSS 15 (SPSS, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades básicas de los suelos

Las propiedades básicas de los suelos estudiados se muestran en la Tabla 1. Los 12 suelos seleccionados presentan un amplio intervalo de variación en las propiedades que se consideran importantes en la dinámica del fosfato. La conductividad eléctrica en todos los suelos fue bastante baja, lo que indica que estos suelos no tienen problemas de salinidad. Los suelos de la zona occidental mostraban un carácter muy ácido con un valor medio de pH de 4,45, mientras en la zona central el pH osciló entre 5,45 y 5,77 de fuerte a medianamente ácido alcanzando un carácter neutro en la zona oriental con un valor medio de 6,66. En todos los suelos la textura varió de arenosa franca a franco limosa, con un contenido de arcilla de 3,22 a 23,22 % (media = 7,35; 13,06 y 17,09 % en la zona occidental, centro y oriental respectivamente). El contenido de materia orgánica osciló entre 2,5 y 4,67 % (media = 3,49; 3,67 y 3,41 % en la zona occidental, centro y oriental respectivamente), concordante con los contenidos que presentan normalmente los suelos de pastizales de las zonas húmedas y frías (Afif y Oliveira, 2008). La relación C/N fue baja (≤ 10) para todos los suelos estudiados, indicando una mineralización favorable que afecta positivamente al contenido de N en el suelo. Los valores del P asimilable extraído por el método de Mehlich 3 en la mayoría de los suelos estudiados estuvieron por debajo del nivel crítico considerado para dicho extractante ($< 30 \text{ mg P kg}^{-1}$) (Monterroso *et al.*, 1999). Los cationes cambiabiles y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) variaron según el porcentaje de arcilla presente en estos suelos, destacando los valores más elevados de Ca, Mg y K cambiabiles en la zona oriental y la ausencia de la acidez intercambiable en la zona central y oriental.

En la matriz de correlación de Pearson entre las propiedades básicas de los suelos (Tabla 2), se observaron altas correlaciones positivas entre el pH y los cationes cambiables Ca, Mg y K y la CICE, con un coeficiente de correlación de 0,947**, 0,842**, 0,825** y 0,911** respectivamente, existiendo también altas correlaciones significativas y positivas entre las bases extraíbles (Ca, Mg y K cambiables) y entre éstas y la CICE. Del mismo modo, el contenido de arcilla estuvo positivamente correlacionado con el Ca y K cambiables y con el pH ($r = 0,602^*$; $0,644^*$ y $0,619^*$ respectivamente), mientras que la acidez intercambiable estuvo negativamente correlacionada con el pH, Ca, Mg y K cambiables y la CICE ($r = -0,803^{***}$; $-0,710^{***}$; $-0,630^*$; $-0,645^*$ y $-0,594^*$ respectivamente). También el contenido de materia orgánica estuvo negativamente correlacionado con la relación C/N con un coeficiente de correlación de $-0,801^{**}$. Se observó una tendencia a que los suelos más fértiles (niveles mayores de bases de cambio y pH menos ácido) tuviesen concentraciones menores de N (Afif y Oliveira, 2008).

TABLA 2

Matriz de correlación de Pearson entre las propiedades básicas de los suelos.

Pearson correlation matrix among the basic soil properties.

	CE	Arc.	MO	N	C/N	PMB	Ca	Mg	K	Al	CICE
pH	0,805**	0,619*	-0,169	-0,391	0,567	0,019	0,947**	0,842**	0,825**	-0,803**	0,911**
CE		0,430	-0,129	-0,304	0,450	0,409	0,827**	0,819**	0,681*	-0,567	0,829**
Arc.			-0,059	-0,183	0,340	-0,194	0,602*	0,271	0,644*	-0,561	0,561
MO				0,928**	-0,801**	0,120	-0,212	-0,166	0,134	-0,127	-0,269
N					-0,952**	0,140	-0,394	-0,351	-0,106	0,106	-0,429
C/N						-0,075	0,546	0,478	0,326	-0,352	0,551
PMB							0,056	0,14	0,031	-0,010	0,068
Ca								0,899**	0,710**	-0,710**	0,988**
Mg									0,640*	-0,630*	0,869*
K										-0,645*	0,682*
Al											-0,594*

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Rendimiento y estado mineral del césped

La materia seca (rendimiento en g maceta⁻¹) es un parámetro comúnmente utilizado para evaluar la respuesta de las plantas a la aplicación de fertilizantes (Afif, 2005; Afif y Oliveira, 2005). La materia seca (MS) del césped para todos los suelos estudiados osciló entre 0,16 y 0,74 g maceta⁻¹ (Tabla 3), mostrando los valores más bajos en los testigos sin fertilizar y los más altos en los suelos fertilizados con fosfato diamónico (fuente

fosfatada de mayor solubilidad). Los fertilizantes de alta solubilidad producen una mayor cantidad de fósforo asimilable en los primeros días del desarrollo del cultivo cuando este elemento es requerido en mayor cantidad, lo que ocasiona una mayor producción de MS (Fernández, 2008). El análisis de la varianza mostró un efecto altamente significativo de las fuentes fosfatadas en todas y cada una de las zonas sobre el rendimiento (MS en g maceta⁻¹) ($F = 7,59, p < 0,01$; $9,89, p < 0,001$; $18,36, p < 0,001$; $31,89, p < 0,001$ para la zona occidental, central, oriental y en el conjunto de los datos respectivamente). Por otra parte, y para todos los tratamientos, los valores medios de la MS fueron mayores en los suelos neutros del oriente, mientras que los valores más bajos se presentaron en los suelos muy ácidos en la zona occidental, mostrando una tendencia estadísticamente significativa ($F = 10,99, p < 0,001$). La mayor disponibilidad del fósforo en suelos de carácter neutro y su riqueza en bases extraíbles favorece el crecimiento del cultivo, mientras que en suelos de carácter ácido la alta inmovilización del fosfato, debida a la formación de complejos insolubles con los sesquióxidos de Fe y Al, constituye una importante pérdida de dicho elemento con una consecuente disminución en el rendimiento del cultivo (Afif, 2005; Turrión *et al.*, 2000; González-Prieto *et al.*, 1996).

Los valores medios de las concentraciones de nutrientes en el césped y las relaciones foliares N:P y Ca:P en todas las zonas estudiadas se presentan en la Tabla 4. La deficiencia más grave fue en K, seguido de N, Ca, y Mg, de acuerdo con los rangos típicos para céspedes publicados por Adams y Gibbs (1994). En todas las zonas estudiadas se observó una relación N:P inferior a 5, por lo que el balance entre ambos nutrientes resultó claramente desequilibrado. Por otro lado, la relación N:P fue mayor en los testigos sin fertilizar que en los tratamientos con diferentes fuentes fosfatadas en todas las zonas estudiadas debido a la alta dosis de P aplicada (200 mg P kg^{-1}) que condicionó la asimilación del N. Un exceso de P asimilable en el suelo puede afectar negativamente la asimilación de otros elementos como el N (Stone, 1982). La relación foliar Ca:P también fue descompensada con valores inferiores a 1,5 en todos los tratamientos y zonas estudiadas, observándose los valores más altos en la zona oriental. Estas relaciones descompensadas pueden interpretarse como un indicativo de un exceso relativo de P frente a las graves deficiencias encontradas de Ca cambiante en todos los suelos menos los de la zona oriental.

Para todos los suelos y tratamientos evaluados, la MS se encontró positivamente correlacionada con la concentración de P en planta y en el suelo tras la cosecha, P absorbido por la planta y la concentración del Ca en planta (Tabla 5), con un coeficiente de correlación de Pearson de $0,74^{**}$; $0,83^{**}$; $0,84^{**}$ y $0,37^*$ respectivamente, lo que sugiere que la aplicación de fertilizantes fosfatados de alta solubilidad aumenta la concentración de P en el suelo y planta y con ello el rendimiento que a su vez se ve afectado por la concentración de Ca en planta.

TABLA 3

Valores medios de la materia seca del césped cultivado en macetas, P Mehlich 3 en el suelo después del cultivo, P en planta, P absorbido por el césped fertilizado y la disolución aparente del P procedentes de tres fuentes fosfatadas.

Mean values for grass dry matter cultivated in pots, P Mehlich 3 in the soil after the cultivation, P plant, P absorbed by the fertilized grass and the P apparent dissolution coming from three phosphorus source.

Zona	Tratamiento ¹	MS ²	PM3 ³	P planta	P absorbido	DA ⁴
		g maceta ¹	mg kg ¹	mg g ¹	mg planta ¹	mg P fertilizante ¹
Occidente	T	0,16 b (0,02)	20,30 c (1,89)	2,27 c (0,47)	0,36 c (0,05)	-
	DAP	0,48 a (0,05)	64,69 a (7,24)	4,92 a (0,40)	2,35 a (0,27)	67,11 a (7,39)
	Complejo PK	0,40 ab (0,04)	36,80 b (2,21)	3,63 b (0,67)	1,44 b (0,18)	38,23 b (2,37)
	SF	0,51 a (0,22)	41,45 b (3,16)	4,06 ab (0,66)	1,70 b (0,32)	33,93 b (20,14)
Centro	T	0,29 b (0,08)	23,37 d (4,58)	2,67 b (0,74)	1,24 b (0,84)	-
	DAP	0,62 a (0,10)	81,00 a (8,87)	5,19 a (0,78)	3,09 a (0,84)	34,07 c (4,28)
	Complejo PK	0,44 ab (0,07)	44,81 c (2,70)	4,42 a (0,53)	1,95 ab (0,52)	46,76 b (3,00)
	SF	0,50 a (0,11)	61,16 b (5,32)	4,72 a (0,50)	1,63 ab (0,87)	62,53 a (4,64)
Oriente	T	0,29 c (0,05)	20,69 c (6,82)	4,05 b (1,33)	1,16 c (0,46)	-
	DAP	0,74 a (0,09)	109,53 a (20,16)	7,49 a (0,79)	5,53 a (0,86)	115,06 a (20,60)
	Complejo PK	0,53 b (0,13)	42,13 c (8,31)	5,44 ab (1,07)	2,88 bc (0,98)	45,01 c (8,18)
	SF	0,66 ab (0,09)	80,64 b (12,91)	6,31 ab (1,19)	4,14 ab (0,90)	84,79 b (13,38)
Datos globales	T	0,24 c (0,08)	21,45 d (4,63)	3,00 c (1,15)	0,92 c (0,65)	-
	DAP	0,61 a (0,13)	85,07 a (22,83)	5,87 a (1,36)	3,66 a (1,56)	72,08 a (36,63)
	Complejo PK	0,45 b (0,10)	41,24 c (5,85)	4,50 b (1,05)	2,09 b (0,86)	43,33 c (6,08)
	SF	0,56 ab (0,16)	61,09 b (18,31)	5,03 ab (1,24)	2,49 b (1,40)	60,42 b (25,26)

Las diferencias significativas en los valores medios se indican con letras distintas, $a > b$ (test de Tukey, $p < 0,05$) y las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis; ¹T: testigo sin fertilizar, DAP: fosfato diamónico (18% N, 46% P₂O₅), Complejo PK (20% P₂O₅, 5% K₂O), SF: superfosfato de cal 18% P₂O₅; ²Materia seca; ³P disponible extraído por el método de Mehlich 3; ⁴Disolución aparente (Ramírez et al., 2001).

P foliar y P absorbido

Entre todos los macronutrientes analizados en el césped, el P fue el único elemento que mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos en las zonas estudiadas ($F = 15,43$, $p < 0,001$; $11,57$, $p < 0,001$; $6,78$, $p < 0,01$; $26,51$, $p < 0,001$ para la zona occidental, central, oriental y en el conjunto de los datos respectivamente). La concentración de P en el césped en todas las zonas varió entre 2,27 y 7,49 mg g⁻¹ (Tabla 3), sin presentar ningún tipo de deficiencia entre los tratamientos. Los menores valores de P fueron para las plantas testigo sin fertilizar y los mayores para las plantas fertilizadas con DAP, debido lógicamente a una mayor disponibilidad de P en los suelos fertilizados

con una fuente fosfatada de alta solubilidad. También, y al igual que el contenido de MS, la concentración media de P foliar fue mayor en la zona oriental y menor en la occidental, siendo las diferencias estadísticamente significativas ($F = 29,01$, $p < 0,001$). La menor capacidad de fijación de P en suelos neutros permitió una mayor disponibilidad de P en el suelo y por ende una mayor concentración de P en planta. Las correlaciones positivas encontradas entre las concentraciones de P foliar y el P asimilable en el suelo después del cultivo, el P absorbido y las concentraciones foliares de Ca y K (Tabla 5), sugieren que el P disponible extraído por el método de Mehlich 3 es capaz de predecir perfectamente el estado mineral del P en la planta y que, aparentemente, la nutrición fosfatada favorece la absorción no solo del P, si no también de otros nutrientes como el Ca y K.

TABLA 4

Valores medios de las concentraciones de nutrientes en césped cultivado en macetas y fertilizado con tres fuentes fosfatadas.

Mean values for nutrients concentration in grass cultivated in pots and fertilized with three phosphorus source.

Zona	Tratamiento ¹	Concentraciones de nutrientes (mg g ⁻¹)				R. foliares ²	
		N	K	Ca	Mg	N:P	Ca:P
Occidente	T	7,54 (0,50)	0,91 (0,10)	0,61 (0,11)	0,24 (0,10)	3,46 (0,96)	0,28 (0,49)
	DAP	7,41 (1,05)	0,85 (0,11)	0,70 (0,08)	0,23 (0,05)	1,50 (0,11)	0,14 (0,01)
	Complejo PK	7,12 (0,93)	0,91 (0,05)	0,63 (0,10)	0,24 (0,03)	1,99 (0,28)	0,17 (0,02)
	SF	6,34 (0,89)	0,79 (0,13)	0,70 (0,15)	0,24 (0,04)	1,57 (0,15)	0,18 (0,02)
Centro	T	6,20 (1,56)	0,71 (0,04)	1,37 (0,22)	0,10 (0,01)	2,35 (0,38)	0,54 (0,19)
	DAP	8,96 (2,14)	0,70 (0,02)	1,27 (0,38)	0,10 (0,01)	1,72 (0,29)	0,25 (0,09)
	Complejo PK	7,49 (1,95)	0,73 (0,02)	1,26 (0,19)	0,09 (0,01)	1,70 (0,44)	0,29 (0,05)
	SF	6,30 (4,17)	0,69 (0,03)	1,38 (0,28)	0,10 (0,01)	1,32 (0,84)	0,29 (0,06)
Oriente	T	8,27 (2,66)	1,46 (0,10)	4,33 (0,66)	0,32 (0,12)	2,27 (1,33)	1,19 (0,49)
	DAP	8,05 (1,95)	1,31 (0,11)	5,20 (0,95)	0,36 (0,13)	1,08 (0,29)	0,70 (0,17)
	Complejo PK	7,71 (1,55)	1,47 (0,10)	4,56 (0,35)	0,34 (0,10)	1,46 (0,44)	0,87 (0,20)
	SF	7,36 (0,91)	1,39 (0,20)	4,64 (0,55)	0,32 (0,13)	1,20 (0,31)	0,76 (0,18)
Datos globales	T	7,34 (1,86)	1,02 (0,34)	2,10 (1,72)	0,22 (0,13)	2,69 (1,05)	0,67 (0,49)
	DAP	8,14 (1,74)	0,95 (0,28)	2,39 (2,16)	0,23 (0,13)	1,43 (0,36)	0,37 (0,27)
	Complejo PK	7,44 (1,41)	1,04 (0,34)	2,15 (1,82)	0,23 (0,12)	1,72 (0,42)	0,44 (0,34)
	SF	6,67 (2,33)	0,96 (0,35)	2,24 (1,83)	0,22 (0,12)	1,36 (0,50)	0,41 (0,28)
R. típicos ³	20-45	10-30	5-20	1-5	-	-	

Las desviaciones estándar se muestran entre paréntesis; ¹T: testigo sin fertilizar, DAP: fosfato diamónico (18% N, 46% P₂O₅), Complejo PK (20% P₂O₅, 5% K₂O), SF: superfosfato de cal 18% P₂O₅; ²Relaciones foliares; ³Rangos típicos publicados por Adams y Gibbs (1994).

La concentración de P foliar y la cantidad de P absorbido (PA) por las plantas son los parámetros más estudiados para evaluar el efecto de los fertilizantes fosfatados (Torres-Dorantes *et al.*, 2006). Al evaluar la cantidad de P absorbido se observaron valores comprendidos entre 0,36 y 4,14 g planta⁻¹, los menores en el testigo y los más altos en el tratamiento con DAP en todas las zonas (Tabla 3). El ANOVA aplicado al PA evidenció un efecto altamente significativo de la fuente fosfatada en todas y cada una de las zonas estudiadas ($F = 51,48$, $p < 0,001$; $4,15$, $p < 0,05$; $20,28$, $p < 0,001$; $34,03$, $p < 0,001$ para la zona occidental, central, oriental y en el conjunto de los datos respectivamente). También se observaron diferencias estadísticamente significativas en los valores medios del PA de todos los tratamientos entre las zonas estudiadas y en la interacción fertilizante-suelo ($F = 37,03$, $p < 0,001$; $F = 4,25$, $p < 0,05$ para las zonas y la interacción tratamiento*zona respectivamente). La mayor cantidad de P absorbido se produjo en la zona oriental y la menor cantidad en la zona occidental, de acuerdo con las concentraciones de P foliar observadas anteriormente en ambas zonas. El PA estuvo significativa y positivamente correlacionado con todas las variables anteriormente analizadas (MS, P asimilable en el suelo después del cultivo y concentraciones foliares de P, Ca, K y Mg), menos con el N foliar (Tabla 5). La relación foliar N:P descompensada puede interpretarse como un indicativo de esta interacción negativa.

TABLA 5

Matriz de correlación de Pearson entre la materia seca (MS), P Mehlich 3 en el suelo después del cultivo (PM3), P absorbido y las concentraciones de nutrientes en el césped.

Pearson correlation matrix among the dry matter (MS), P Mehlich 3 in the soil after the cultivation (PM3), P absorbed and nutrients concentration in grass.

	PM3	MS	P planta	Ca planta	K planta	Mg planta	N planta
P absorbido	0,838**	0,656**	0,883**	0,578**	0,431**	0,322*	0,17
PM3		0,832**	0,769**	0,365*	0,163	0,211	0,203
MS			0,740**	0,380**	0,212	0,268	0,233
P planta				0,589**	0,434**	0,229	0,236
Ca planta					0,846**	0,581**	0,228
K planta						0,743**	0,263
Mg planta							0,286*

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Disolución aparente e índice de eficiencia agronómica

Los mg de P disueltos de cada fertilizante (disolución aparente) es un parámetro que no incluye el P fijado y de allí su dominación aparente (Ramírez *et al.*, 2001). La DA varió entre 33,93 mg P para el superfosfato de cal en la zona occidental y 115,06

mg P para el DAP en la zona oriental (Tabla 3). En la zona central, la DA fue mayor en el superfosfato de cal y menor en el DAP, debido a que bajo condiciones ácidas se produce una mayor disolución de la fracción insoluble del superfosfato de cal. No obstante, gran parte de este P disuelto, se inmovilizó formando compuestos insolubles con los sesquióxidos de Fe y Al o bien quedó fuertemente adsorbido en la superficie de la arcilla, presente, en un alto porcentaje de estos suelos. Esta situación fue comprobada con las anteriores variables estudiadas y sus correlaciones con el rendimiento, de modo que la mayor cantidad de P disuelto no se reflejó en una mayor concentración de P en el césped tratado con superfosfato de cal. Meza *et al.* (2003), evaluando la DA de P en varios fertilizantes fosfatados aplicados a suelos ácidos con una dosis de 200 mg P kg⁻¹, observaron una elevada cantidad de P disuelto procedente de roca fosfórica natural utilizada como fuente fosfatada, siendo nula su influencia en el rendimiento del cultivo. En la zona oriental el DAP logró una mayor cantidad de P disuelto debido al pH neutro de estos suelos, según lo señalado por Hammond *et al.* (1986), mientras que en la zona occidental y debido probablemente a una extremada acidez, las cantidades de P disuelto para todos los tratamientos fueron mucho más bajas.

Las diferencias entre los fertilizantes evaluados en relación con la DA han sido estadísticamente significativas en todas las zonas ($F = 13,07; 57,62; 22,09; 19,06; p < 0,001$ para la zona occidental, central, oriental y en el conjunto de los datos respectivamente). Los valores medios de la DA de los tratamientos entre las zonas estudiadas y en la interacción fertilizante-suelo también han sido estadísticamente significativas ($F = 36,22; 17,25; p < 0,001$ para las zonas y la interacción tratamiento*zona respectivamente).

Los valores del índice de eficiencia agronómica (ÍEA) para la MS del césped se encontraron comprendidos entre 45,79 y 82,09 %, excluyendo los valores del fertilizante de referencia DAP (100%) por tener la mayor solubilidad de los fertilizantes evaluados (Büll *et al.*, 1997). En todas las zonas estudiadas, los valores más altos del ÍEA fueron observados cuando se fertilizó con superfosfato de cal (Tabla 6). El ÍEA para la MS se clasificó como medio cuando se fertilizó con superfosfato en la zona occidental y oriental y como bajo en la zona central, de acuerdo con las anotaciones de Hammond *et al.* (1986). Para el complejo PK, el ÍEA se clasificó como medio en la zona occidental y bajo en la zona central y oriental.

El superfosfato simple produjo en todas las zonas un contenido mayor de MS, P foliar y asimilable en el suelo que el complejo PK. Sin embargo, en la zona central el P absorbido fue menor para el superfosfato, hecho que quedó reflejado en la clasificación de su ÍEA. Por otro lado, en la zona occidental la DA de P fue superior en el complejo PK y inferior en el superfosfato sin originar mayor absorción de P por la planta, debido a la alta capacidad de estos suelos para inmovilizar el P. Sin embargo, y a pesar de este hecho, el ÍEA se clasificó como medio para el complejo PK en la zona occidental.

Numerosos investigadores señalaron que las fuentes fosfatadas de baja solubilidad producen una mayor disolución de P en suelos ácidos sin llegar a favorecer la absorción de P por las plantas, y, por ende, el crecimiento del cultivo, debido a la alta capacidad de retención de P en estos suelos (Meza *et al.*, 2003; Savini *et al.*, 2006; Fernández, 2008).

TABLA 6

Valores medios del índice de eficiencia agronómica (%) calculado con los valores de la materia seca del césped fertilizado con tres fuentes fosfatadas.

Mean values for agronomic efficiency index (%) calculated with the values of the grass dry matter fertilized with three phosphorus source.

Zona	Tratamiento		
	DAP	Complejo PK	SF
Occidente	100	75,90 M	80,82 M
Centro	100	45,79 B	65,70 B
Oriente	100	52,63 B	82,09 M
Datos globales	100	58,11 B	76,20 M

*A: alto (100-85%); M: medio (84-70%); B: bajo (69-40%); MB: muy bajo (<40%) (Hammond *et al.*, 1986).*

CONCLUSIONES

Las propiedades de los suelos seleccionados de la zona occidental, central y oriental del Principado de Asturias, representaron adecuadamente los intervalos de variación esperados en las propiedades que se consideran importantes en la dinámica del fosfato.

La mezcla de césped recreativo cultivado en macetas en invernadero respondió significativamente a la fertilización fosfatada. La mayor absorción de P y producción de masa seca en todos los suelos se produjo con el uso de fosfato diamónico. El estado mineral del césped mostró graves deficiencias en K, N, Ca y Mg y unas relaciones foliares N:P y Ca:P desequilibradas.

Los valores medios del rendimiento relativo del césped (materia seca), P asimilable en el suelo, P foliar y P absorbido mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para todas y cada una de las zonas estudiadas.

El superfosfato de cal presentó una mayor concentración de P disponible extraído por el método de Mehlich 3 que el complejo PK, así como una mayor cantidad de P absorbido por la planta en todas las zonas excepto en los suelos ácidos de la zona central. En estos suelos el superfosfato de cal presentó una mayor disolución de fósforo que no fue

aprovechado por el césped debido a que gran parte del P disuelto se inmovilizó formando compuestos insolubles con los sesquióxidos de Fe y Al.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, W.A.; GIBBS, R.J., 1994. *Natural Turf for Sport and Amenity*. Science and Practice. Editor CAB International, 31 pp. Wallingford (UK).
- AFIF, E., 2005. *Dinámica del fósforo en suelos calcáreos de áreas mediterráneas: trabajo experimental*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo, 110 pp. Oviedo (España).
- AFIF, E.; BARRÓN, V.; TORRENT, J., 1995. Organic Matter delays but does not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. *Soil Sci.*, **159**, 206- 212.
- AFIF, E.; MATAR, A.; TORRENT, J., 1993. Availability of phosphate applied to calcareous soil of West Asia and North Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 756-760.
- AFIF, E.; OLIVEIRA, J.A., 2005. Pérdida de disponibilidad y niveles críticos de fósforo Mehlich 3 en suelos no calcáreos de Asturias. *Pastos*, **35**, 163-178.
- AFIF, E.; OLIVEIRA, J.A., 2008. Relación propiedades edáficas – estado nutricional de pastos en varios puertos de Asturias. En *Actas XLVII Reunión Científica de la SEEP*, 281-286. Ed. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Córdoba (España).
- BÜLL, L.; LACERDA, S.; NAKAGAWA, J., 1997. Termofosfatos: Alterações em propriedades químicas em um latossolo vermelho-escuro e eficiência agronômica. *Bragantia Campinas*, **56**, 169-179.
- BUONDONNO, A.; COPPLA, E.; FELLECA, D.; VIOLANTE, P., 1992. Comparing test for soil fertility: 1. Conversion equation between Olsen and Mehlich 3 as phosphorus extractants for 120 soils of South Italy. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **23**, 699-716.
- CARREIRA, J.; VIÑEJLS, B.; LAJTHA, K., 2006. Secondary CaCO₃ and precipitation of P-Ca compounds control the retentions of soil P in arid ecosystems. *J. Arid Environ.*, **64**, 460-473.
- COX, F. R., 1996. Economic phosphorus fertilization using a lineal response and plateau function. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **27**, 531-543.
- DOLFING, J.; CHARDON, W.; JAPENGA, J., 1999. Association between colloidal iron, aluminium, phosphorous and humic acids. *Soil Sci.*, **164**, 171-179.
- FERNÁNDEZ, M.S., 2008. *Dinámica del fósforo edáfico y eficiencia agronómica de cuatro fuentes fosfatadas en un Ultisol y en un Alfisol Venezolanos cultivados con maíz y fríjol*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, 249 pp. Palencia (España).
- FERNÁNDEZ, M.L., 1997. Evaluación en cámara de crecimiento de tres métodos de determinación de fósforo asimilable en suelos no calcáreos. *Edafología*, **3**, 189-203.
- GAHOONIA, T.; RAZA, S.; NIELSEN, N., 1994. Phosphorus depletion in the rhizosphere as influenced by soil moisture. *Plant and Soil*, **159**, 231-218.
- GONZÁLEZ-PRIETO, S.J.; CABANEIRO, A.; VILLAR, M.C.; CARBALLAS, M.; CARBALLAS, T., 1996. Effect of soil characteristics on N mineralization capacity in 112 native and agricultural soils from the northwest of Spain. *Biology and fertility of Soils*, **22**, 252-260.
- HAMMOND, J.; CHIEM, S.; MOKWUNYE, A., 1986. Agronomic values of an acidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv. Agron.*, **40**, 89-139.

- HOLFORD, I.C.R., 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.*, **35**, 227-239.
- IGME, 2001. *Mapa Geológico de España, Asturias*. Serie Técnica (E: 1/50.000). Ministerio de Industria, Madrid (España).
- JACKSON, M.L., 1964. *Análisis químicos de suelos*. Ediciones Omega, 198 pp. Barcelona (España).
- JONES, J.B.; WOLF, B.; MILL, H.A., 1991. *Plant Analysis Handbook: A Practical Sampling Preparation. Analysis and Interpretation Guide*, Micro-Macro Publishing. 213 pp. Athens (Greece).
- JUNGK, A., 1987. Soil-root interactions in the rhizosphere affecting plant availability of phosphorus. *J. Plant Nutr.*, **10**, 1197-1204.
- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E., 1980. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soils. In: *Role of phosphorus in Agriculture*, 333-359. Ed. F. E. Khasaweneh, E. S. Simple, E. J. Kamprath. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin (USA).
- KLUTE, A., 1996. Nitrogen-total. In *Methods of Soil Analyses*, part 1, 2nd edition, 595-624. Ed. A. Klute. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin (USA).
- LAJTHA, K.; BLOOMER, H., 1988. Factors affecting phosphate sorption and phosphate retention in a desert ecosystem. *Soil Sci.*, **146**, 160-167.
- LIN, C.; BUSSCHER, W.; DOUGLAS, L., 1983. Multifactor kinetics of phosphate reactions with minerals in acidic soils. I Modelling and simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 1097-1103.
- LINDSAY, W., 1979. Phosphate. In: *Chemical equilibrium in soils*, 162-205. Ed. John Wiley & Sons Inc. New York (USA).
- MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V.; HORST, W.; MARTIN, M., 1986. Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.*, **149**, 441-456.
- MEHLICH, A., 1985. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Soil Sci. and Plant Anal.*, **15**, 1409-1416.
- MENDOZA, R.E.; BARROW, N.J., 1987. Characterizing the rate of reaction of some argentinian soils with phosphate. *Soil Sci.*, **143**, 105-112.
- MEZA, C.; FERNÁNDEZ, S.; MELENDEZ, L., 2003. Roca fosfórica de Riecito tratada con vinaza y altas temperaturas como fuente de fósforo para el maíz. *Agron. Trop.*, **53** (3), 315-330.
- MONTERROSO, C.; ÁLVAREZ, E.; FERNÁNDEZ MARCOS, M. L., 1999. Evaluation of Mehlich 3 reagent as a multielement extractant in mine soils. *Land Degradation and Development*, **10**, 35-47.
- NORRISH, K.; ROSSER, H., 1983. Mineral phosphate. In: *Soils: An Australian viewpoint*. 335-361. Ed. Melbourne. CSIRO-Academic Press, Londres (UK).
- NYCHAS, A.E.; KOSMAS, C.S., 1984. Phosphate adsorption by dark alkaline vertisols in Greece. *Geoderma*, **32**, 319-327.
- OLSEN, S.R.; SOMMERS, L.E., 1982. Phosphorus. In: *Methods of soil analysis, part 2*, 85-114. Ed. A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney. Chemical and Microbiological Properties. Madison, Wisconsin (USA).
- PEÑA, F.; TORRENT, J., 1990. Predicting phosphate sorption in soils of mediterranean regions. *Fertilizer Research*, **23**, 173-179.
- RAIJ, B., 1994. New diagnostic techniques universal soil extractants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **25**, 799-816.

- RAMÍREZ, R.; FERNÁNDEZ, S.; LIZASO, J., 2001. Changes of pH available phosphorus and calcium in rhizosphere of aluminium-tolerant maize germplasm fertilized with phosphate rock. *Commun Soil Sci. Plant Anal.*, **32**, 1551-1565.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J., 1980. Reaction of phosphate fertilizers in soils. In: *The role of phosphorus in agriculture*, 263-304. Ed. F.E. Khasawneh, E.C. Simple, E.J. Kamprath. ASA, CSSA y SSSA. Madison, Wisconsin (USA).
- SAVINI, I.; SMTHSON, P.; KARANJA, K.; YAMASAKI, H., 2006. Influence of Tithonia diversifolia and triple superphosphate on dissolution and effectiveness of phosphate rock in acidic soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **169**, 593-604.
- SOIL SURVEY STAFF, 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Agricultural Handbook 436, 2nd edition, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 869 pp. Washington DC (USA).
- SPSS, 2006. SPSS para windows, version 15. SPSS Inc.
- STONE, E.L., 1982. Observation on forest nutrition research in Australia. *Aus. For.*, **45** (3), 181-192.
- TAGLIAVINI, M.; MASIA, A.; QUARTIERI, M., 1995. Bulk soil pH and rhizosphere pH of peach trees in calcareous and alkaline soils as affected by the form of nitrogen fertilizer. *Plant and Soil*, **176**, 263-271.
- THOMPSON, L.M.; TROEH, F.R., 2008. *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté (4^o ed.), 661 pp. Barcelona (España).
- TORRES-DORANTES, L.; CLAASSEN, N.; STEINGROBE, B.; OLFS, H., 2006. Fertilizer-use efficiency of different inorganic polyphosphate source: effect on soil P availability and plant P acquisition during early growth of corn. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **169**, 509-515.
- TURRIÓN, M.B.; GALLARDO, J.; GONZÁLEZ, M., 2000. Distribution of P forms in natural and fertilized forest soils of the central Western Spain: plant response to superphosphate fertilization. *Arid. Soil. Res. Rehabil.*, **14**, 159-173.
- TURRIÓN, M.B.; LÓPEZ, O.; LAFUENTE, F.; MULAS, R.; RUIPÉREZ, C.; PUYO, A., 2007. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Sci. Total Environ.*, **36**, 207-399.
- WALBRIDGE, M.; RICHARDSON, C.; SWANK, W., 1991. Vertical distribution of biological and geochemical phosphorus subcycles in two southern Appalachian forest soils. *Biogeochemical*, **13**, 61-85.
- WHITE, R.E., 1980. Retention and release of phosphate by soil and soil constituents. In: *Soil and Agriculture*, 71-114. Ed. P.B. Tinker. Halstead Press. New York (USA).
- ZHANG, M.; ALVA, A.; LI, Y.; CALVERT, D., 2001. Aluminium and iron fractions affecting phosphorus solubility and reactions in selected sandy soils. *Soil Sci.*, **166** (6), 374-381.

AGRONOMIC EFFICIENCY OF THREE PHOSPHORUS SOURCES ON GRASS TURF UNDER CONTROLLED CONDITIONS

SUMMARY

A group of 12 soils have been selected of the western, central and oriental areas of Asturias (NW Spain) to evaluate the effect of three phosphorus sources on dry biomass production and P absorption of a commercial grass turf, cultivated in pots in a greenhouse. The soils of the western, central and oriental areas, were very strongly acid, moderately acid and neutral, respectively. Four treatments were established: 1) soil without fertilizer. 2) 200 mg P kg⁻¹ coming from diammonium phosphate (DAP, 18% N, 46% P₂O₅), 3) complex PK (20% P₂O₅, 5% K₂O) and 4) simple superphosphate (SF, 18% P₂O₅). DAP showed the highest P absorption levels and highest dry biomass production, on all the soils. SF showed higher concentration of available P in the soil than the complex PK, for all the areas, and a higher quantity of P absorbed, except on the acidic soils of the central area. In this area, SF treatment showed a higher dissolved P that was not used by the grass due to the high capacity of these soils to immobilize P.

Key words: Assimilable phosphorus, diammonium phosphate, plant analysis, soil analysis.