

NIVELES CRÍTICOS DE FÓSFORO EN SUELOS NATURALES NO CALCÁREOS DEL OCCIDENTE ASTURIANO

E. AFIF KHOURI ; J. A. OLIVEIRA PRENDES Y A. CÁMARA OBREGÓN

Universidad de Oviedo. Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Escuela Universitaria de Ingenierías Técnicas. Calle Gonzalo Gutiérrez de Quirós s/n. 33600 Mieres (España). elias@uniovi.es

Mesa Temática: Caracterización, dinámica y biodiversidad de los ecosistemas forestales.

Resumen

En diez suelos no calcáreos del occidente Asturiano se estimó el nivel crítico de fósforo asimilable mediante extracción con el reactivo químico Mehlich 3 (M3) en condiciones controladas de crecimiento de trébol violeta en macetas. Las correlaciones significativas obtenidas entre el índice de disponibilidad (ID) del fosfato añadido (proporción entre el incremento del fósforo M3 analizado y el total aplicado a los suelos) y ciertas propiedades del suelo a los 30 días de incubación, sugieren que los óxidos de aluminio y hierro no cristalinos son los sorbentes más activos en este tipo de suelos. La media de los niveles críticos calculados a partir de los parámetros de las ecuaciones simples de Mitscherlich para un rendimiento del 80% del máximo, fue de 10 mg P kg^{-1} . Las correlaciones obtenidas entre los niveles críticos del fósforo M3 y las propiedades del suelo mostraron que el nivel crítico tiende a ser más bajo en suelos con un alto contenido de variables que expresan la medida de la superficie disponible para la adsorción de fosfato, entre estas últimas están los óxidos de hierro y aluminio de poca cristalinidad y el contenido de arcilla.

Palabras clave: Adsorción de fósforo, análisis de suelo, fósforo asimilable, reactivo Mehlich3

INTRODUCCIÓN

Una pequeña cantidad, del orden del 15% del fósforo aplicado a los suelos, es utilizado por los cultivos de forma inmediata, el resto del fósforo se convierte en formas insolubles de la fracción no lábil, incidiendo desfavorablemente sobre la economía de la aplicación de los fertilizantes fosfatados. Los resultados de distintos autores como SHARPLEY et al. (1989), TORRENT et al. (1991), HOLFORD (1997) y AFIF et al. (2004) sobre el efecto de los diferentes componentes del suelo en la pérdida de disponibilidad del fosfato aplicado no son comparables, aunque es probable que muchos factores influyan en el proceso, tanto de composición del suelo como ambientales. En la rutina habitual la disponibilidad del fósforo en el suelo se estima mediante las cantidades extraídas por distintos extractantes. El extractante Mehlich 3 (MEHLICH, 1985), ampliamente usado en Estados Unidos y Canadá (BUONDONNO et al., 1992; RAIJ, 1994), resulta altamente correlacionado con la extracción de fósforo por la planta y con el rendimiento vegetal en suelos no calcáreos ricos en componentes no cristalinos (FERNÁNDEZ, 1997; MONTERROSO, et al., 1999; AFIF et al., 2004).

Existe una posibilidad razonable de conseguir un ahorro en la fertilización fosfatada, si se conoce el nivel de fósforo en suelo por encima del cual no es probable que exista respuesta al abonado, teniendo siempre presente que los niveles críticos dependen principalmente del tipo de cultivo, propiedades del suelo y condiciones ambientales. Por esta razón y en el presente trabajo, se estudiaron en un grupo de suelos naturales principalmente de la zona occidental del Principado de Asturias, la relación entre nivel crítico de fósforo Mehlich 3 para trébol violeta y las propiedades del suelo, con especial referencia a las propiedades mineralógicas del mismo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se tomaron diez muestras de suelos naturales a 0-20 cm de profundidad, en distintos lugares del occidente Asturiano (Boal, Grandas de Salime, Cartavio, Cangas de Narcea, Tineo y Villaviciosa), y que comprenden Udorthent, Eutrudept y Dystrudept desarrollados en distintos materiales parentales (rocas básicas, areniscas, cuarcitas apizarradas y gneis). El suelo recogido en ningún caso había sido abonado recientemente con fosfato.

Una pequeña parte de la tierra fina se almacenó para los análisis posteriores y con el resto se realizó un experimento de agotamiento para obtener un nivel de fósforo Mehlich 3 bajo ($\text{PM3} < 5 \text{ mg kg}^{-1}$), cultivándose varias veces (2-3 repeticiones, dependiendo del fósforo Mehlich 3 en el suelo inicial)

con una alta densidad de *Lolium multiflorum* (raigrás italiano, variedad del país - Ordenes) en invernadero, a temperatura $22 \pm 3^\circ \text{C}$. Las plantas se cortaron 40 días después de la siembra. Al suelo, una vez seco al aire, se le eliminaron las raíces y se tamizó (2 mm de malla) para repetir de nuevo el experimento de agotamiento, tal como se ha descrito.

Entre las propiedades físico-químicas se determinó la textura según el método de la pipeta usando hexametáfosfato sódico más 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. El carbono orgánico se determinó por ignición; el pH potenciométricamente en una suspensión suelo:agua 1:2,5; bases extraíbles + Al de cambio, con ClNH_4 1 N, por absorción atómica; el fósforo disponible se determinó por el método de Mehlich 3 (MEHLICH, 1985); los óxidos de hierro y aluminio pobremente cristalinos fueron extraídos con oxalato-amónico ácido según el método de BLAKEMORE (1978) y el contenido de hierro y aluminio ligados a la materia orgánica fue extraído con pirofosfato sódico 0,1 M por el método de BASCOMB (1968).

Muestras de 100 g de suelo procedentes del experimento de agotamiento se incubaron con cantidades crecientes de fosfato monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) (0, 30, 60, 90 y 150 mg P kg^{-1}) en vasos de polietileno a $22 \pm 2^\circ \text{C}$. Se adicionó el fosfato en disolución para todos los niveles (dos repeticiones para cada nivel), agregando diariamente la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de campo. De estos suelos se tomaron 10 g después de 30 días, a fin de analizar el fósforo extraíble por el reactivo Mehlich 3. La razón de este experimento fue calcular el coeficiente de fijación de fósforo (la proporción entre el fósforo total aplicado y PM3 obtenido tras 30 días de incubación, restando el PM3 correspondiente al suelo agotado) (AFIF et al., 2004).

El experimento de niveles críticos de fósforo se hizo en macetas conteniendo cada maceta 250 g de suelo previamente agotado, con dos repeticiones para cada tratamiento. Los tratamientos fueron cinco: el primero con suelo agotado sin fertilizar, los otros cuatro con $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ añadido, a fin de obtener después de un mes de incubación a capacidad de campo y temperatura ambiente diferentes niveles de fósforo (aproximadamente 5, 10, 15 y 20 mg P kg^{-1}). Se calculó el fertilizante a añadir a partir del anterior coeficiente de fijación de fósforo (ID) en el nivel 90 mg P kg^{-1} . Después de 30 días de añadir el fosfato en disolución a las macetas de forma homogénea (usando bolsas de plástico), se analizó PM3 de cada una de ellas y se procedió al cultivo en invernadero. En cada maceta se colocaron 12 semillas de *Trifolium pratense* (trébol violeta, variedad comercial Maragato). Los suelos se abonaron con una disolución compuesta por las siguientes concentraciones de nutrientes: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1,19 g ml^{-1} , $\text{KNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,51 g ml^{-1} , MgSO_4 0,49 g ml^{-1} , Fe(6%) 0,02 g ml^{-1} y microelementos compuesto por: KCl 4 $\mu\text{g ml}^{-1}$, H_3BO_3 1,55 mg ml^{-1} , $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,34 mg ml^{-1} , $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,58 mg ml^{-1} , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,13 mg ml^{-1} , $\text{Na}_2\text{MOO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,67 mg ml^{-1} . Dicha disolución se dosificó en varios riegos por maceta de 15 ml aproximadamente cada uno, volumen para conseguir un buen desarrollo en las plantas durante un periodo experimental de 45 días. Finalmente, y después de este periodo, se cortaron las plantas a ras del suelo, transfiriendo el material vegetal fresco a una estufa a 70°C durante 48 h, determinando así el peso del material vegetal seco. 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. El tratamiento estadístico de los datos se realizó mediante el programa SPSS 11.5 (SPSS, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades básicas de los suelos estudiados se muestran en la Tabla 1. Dentro de los compuestos de Al y Fe de baja cristalinidad, los de naturaleza no orgánica (obtenidos por diferencia entre las extracciones de oxalato ácido y pirofosfato: Al_O - Al_p , Fe_O - Fe_p) son, en general, menos abundantes que los de carácter orgánico, Al_p y Fe_p , como es habitual en suelos ricos en materia orgánica (ÁLVAREZ et al., 1992; AFIF et al., 2004). En la matriz de correlación entre las propiedades básicas de los suelos, se observaron buenas correlaciones entre el contenido de materia orgánica y los óxidos de Fe y Al extraídos con oxalato amónico tamponado a pH 3, con un coeficiente de correlación de

0,85^{***} y 0,64^{**} respectivamente y con los compuestos de Fe y Al no cristalinos inorgánicos ($r = 0,56^{**}$ y $0,74^{***}$ respectivamente). Del mismo modo se encontraron buenas correlaciones entre el Al_O y el contenido de Fe y Al extraídos con pirofosfato sódico 0,1 M, con un coeficiente de correlación de $0,44^*$ y $0,70^{***}$ respectivamente, existiendo también una correlación entre estas dos últimas ($r = 0,45^*$).

Tras adicionar cantidades crecientes de fosfato a una porción de 100 g de suelo agotado, se calcularon a los 30 días para todos los niveles de adición, los índices de disponibilidad (ID). Estos se definieron como la proporción entre el incremento del fósforo Mehlich 3 y el total de fósforo aplicado a los suelos. El motivo principal de seleccionar y calcular el ID en este estudio, es hallar la cantidad de fósforo necesario para alcanzar un nivel de PM3 (FIXEN & CROVE, 1990). El ID para el nivel de adición 30 mg P kg^{-1} oscilaba entre 0,06 y 0,51 (media = 0,20) y estaba negativamente correlacionada con el Fe_O-Fe_P ($r = -0,50^*$). La media de los ID para aplicaciones de 90 y 150 mg P kg^{-1} fue negativa y significativamente correlacionada con el contenido de materia orgánica, Fe_O , Al_O , Al_O-Al_P y Fe_O-Fe_P ($r = -0,53^*$, $-0,52^*$, $-0,66^{**}$, $-0,75^{***}$ y $-0,46^*$ respectivamente).

Estos resultados indican que en comparación con otras propiedades del suelo, los óxidos de aluminio y hierro poco cristalinos abundantes en suelos no calcáreos, junto con los componentes orgánicos son los compuestos que dominan la adsorción de fosfato. El efecto de los óxidos de Al y Fe en la adsorción de fosfato para diferentes niveles de adición, ha sido encontrado en otros estudios (TORRENT et al., 1991; AFIF et al., 1993, 2004).

En un análisis de regresión múltiple para el nivel de adición de 30 mg P kg^{-1} , tomando la CICE se obtiene una varianza explicada del 11%, añadiendo el contenido de los óxidos de hierro poco cristalinos, se consigue una varianza explicada del 51%, siendo la ecuación:

$$ID_{30} = 0,27 + 0,029CICE - 0,058Fe_O, \quad R^2 = 0,51$$

La varianza explicada anteriormente aumenta al considerar el Fe no cristalino inorgánico:

$$ID_{30} = 0,13 + 0,022CICE - 0,047(Fe_O-Fe_P), \quad R^2 = 0,58$$

Estos resultados indican que a bajos niveles de adición de fósforo y en un corto periodo de tiempo, los óxidos de hierro poco cristalinos inorgánicos presentan superficies de alta afinidad para la adsorción de fosfato, ya que la mayor superficie específica de los óxidos de aluminio y hierro de poca cristalinidad hace que tengan mayor capacidad de adsorción de fosfato por unidad de masa.

Para el nivel de adición de 150 mg P kg^{-1} , tomando los óxidos de aluminio de baja cristalinidad se obtiene una varianza explicada del 61%, añadiendo el contenido de arcilla, se consigue una varianza explicada del 62%:

$$ID_{30} = 0,52 - 0,0001Ar - 0,042Al_O, \quad R^2 = 0,62$$

La varianza explicada anteriormente reflejada aumenta cuando se considera el Fe_O en lugar de la arcilla, siendo la ecuación:

$$ID_{30} = 0,57 - 0,019Fe_O - 0,037Al_O, \quad R^2 = 0,65$$

Comparando las últimas dos ecuaciones de regresión, el coeficiente de regresión correspondiente al Fe_O es superior al de la arcilla. Esto indica que los óxidos de hierro de baja cristalinidad dan probablemente una mejor medida de la superficie disponible para la adsorción de fosfato. Se ha comprobado que en los suelos de zonas húmedas y frías con alto contenido en hierro y aluminio de poca cristalinidad y mayor superficie específica, hay una correlación entre la adsorción de fosfato y el hierro y aluminio extraíbles por oxalato amónico ácido y la capacidad de adsorción es bastante mayor que si tuvieran la misma cantidad de óxidos pero cristalinos (MONTERROSO *et al.*, 1996; FERNÁNDEZ, 1997).

Para examinar la relación entre el valor del fósforo Mehlich 3 antes del cultivo y la respuesta de la planta (materia seca en g maceta^{-1}) se utilizó una ecuación simple de Mitscherlich:

$Y = A(1 - e^{-BX})$ donde Y es rendimiento, A es rendimiento máximo, B es un coeficiente que es mayor cuando mayor es la curvatura y X es PM3 antes del cultivo. En el experimento realizado, hubo

respuesta al abonado en todos los suelos previamente agotados en fósforo. Esto es lógico dados los bajos valores de fósforo Mehlich 3 de los que se partía (generalmente menores de 5 mg P kg^{-1}). Para comparar suelos se calculó el valor crítico del fósforo Mehlich 3 a partir de los parámetros A y B de la anterior ecuación. Se consideró para ello un rendimiento del 80% del máximo. Como ejemplo la Fig. 1 presenta el ajuste de los datos experimentales a la ecuación simple de Mitscherlich para dos muestras de suelo diferentes, mientras que la Tabla 2 presenta los parámetros de la ecuación de Mitscherlich y los valores críticos correspondientes calculados a partir de dichos parámetros.

La correlación entre el rendimiento relativo (materia seca) y el fósforo Mehlich 3 antes del cultivo fue altamente significativa (R^2 alrededor de 0,9) en todas las muestras. Los valores críticos correspondientes de PM3 así calculados oscilaban entre 4,2 y $17,9 \text{ mg P kg}^{-1}$ y estaban negativa y significativamente correlacionados con el Al_O , Al_P y $(\text{Al}_\text{O}-\text{Al}_\text{P})$ ($r = -0,64^{**}$, $-0,74^{***}$ y $-0,49^*$ respectivamente) y con la suma $\text{Ar}+20\text{Al}_\text{O}$, $\text{Ar}+20[(\text{Al}_\text{O}+\text{Fe}_\text{O})+(\text{Al}_\text{P}+\text{Fe}_\text{P})]$ y $\text{Ar}+20(\text{Al}_\text{O}-\text{Al}_\text{P})$ ($r = -0,54^*$, $-0,54^*$ y $-0,44^*$ respectivamente) (Tabla 3). El coeficiente de 20 se aplica para compensar el más alto poder adsorbente de los óxidos de Al y Fe respecto a la arcilla y representa el cociente medio de los coeficientes de regresión de ambas variables en regresiones múltiples de fósforo sorbido en distintos grupos de suelo (PEÑA & TORRENT, 1990; AFIF et al., 1993). Diversos autores observaron un incremento del rendimiento en materia seca hasta valores muy altos de fósforo extraído por el reactivo M3, dando como nivel crítico valores de 30-60 mg P kg^{-1} (BUONDONNO et al., 1992); 25 mg P kg^{-1} (COX, 1996). Esta respuesta de las plantas al fósforo extraído se interpreta como consecuencia de la corta duración del experimento (15 días en cámara de crecimiento). Los resultados obtenidos para plantas jóvenes posiblemente no son generalizables a plantas con un sistema radicular más desarrollado (HOLFORD, 1997).

Los resultados presentes muestran que el nivel crítico PM3 para el trébol violeta tiene tendencia a aumentar con la disminución de la cantidad de óxidos de Al no cristalinos y dentro de éstos los de naturaleza inorgánica ($\text{Al}_\text{O}-\text{Al}_\text{P}$) o bien con la disminución de la suma de variables que expresan la cantidad de superficies adsorbentes “puras”, entre los cuales están el contenido de arcilla, los compuestos de Al y Fe de poca cristalinidad, los de carácter orgánico ($\text{Al}_\text{P}+\text{Fe}_\text{P}$) y los óxidos de Al no cristalinos inorgánicos. Analizando distintos estudios, HOLFORD (1997) encuentra que los extractantes más efectivos son los mejor correlacionados negativamente con la capacidad amortiguadora (capacidad de adsorción) de fosfato. En este sentido hay que señalar que, de acuerdo con HOLFORD (1997), la influencia de la capacidad amortiguadora de fosfato disminuye con el tiempo, a medida que el desarrollo del sistema radicular de la planta le permite acceder a una proporción creciente del fósforo del suelo.

Las correlaciones significativas y positivas encontradas entre los valores críticos y la combinación de variables, tales como $\text{CICE}/\text{Al}_\text{O}+\text{Fe}_\text{O}$, $\text{CICE}/\text{Al}_\text{P}+\text{Fe}_\text{P}$ y $\text{CICE}/\text{Ar}+(\text{Fe}_\text{O}-\text{Fe}_\text{P})+(\text{Al}_\text{O}-\text{Al}_\text{P})$, con un coeficiente de correlación de $0,72^{***}$, $0,62^{**}$ y $0,52^*$ respectivamente (Tabla 3), indican que PM3 crítico tiende a aumentar con el aumento de la razón entre la suma de las bases de intercambio catiónico + Al de cambio y las variables que indican la cantidad de superficies adsorbentes. Es evidente que, en una situación ideal, el método Mehlich 3 tendría que extraer una porción del P lábil (fósforo insoluble pero accesible que está en equilibrio rápido con el fosfato de la solución del suelo y que se libera cuando el fósforo en disolución es extraído por las raíces de las plantas) que estuviera relacionada con la facilidad con que las plantas extraen dicho fosfato lábil, es decir, que calibrará adecuadamente la capacidad tampón del suelo que es a su vez una función del contenido de óxidos de Al y Fe y de la arcilla. La presente investigación muestra que el extractante M3 es bastante sensible a las propiedades de los suelos no calcáreos a la hora de extraer una porción del P lábil. El extractante sobreestima el P lábil en suelos ricos en bases y pobres en arcilla y óxidos de Al y Fe no cristalinos y dentro de estos últimos las de naturaleza no orgánica.

CONCLUSIÓN

Los diez suelos seleccionados presentan un amplio intervalo de variación en las propiedades que se consideran importantes en la dinámica del fosfato. A bajos niveles de adición de fósforo y en un corto periodo de tiempo, los óxidos de hierro poco cristalinos inorgánicos, menos abundantes que los de

carácter orgánico, presentan superficies de alta afinidad para la adsorción de fosfato.

En el experimento realizado para estudiar el nivel crítico del fósforo mediante extracción con el reactivo químico Mehlich 3, en macetas con trébol violeta, el ajuste de los datos experimentales a una ecuación simple de Mitscherlich fue muy bueno. La media de los niveles críticos calculados a partir de los parámetros A y B de las ecuaciones de Mitscherlich para un rendimiento del 80% del máximo, fue de 10 mg P kg⁻¹. Las correlaciones obtenidas entre los niveles críticos del fósforo y las propiedades del suelo que más influye en su pérdida de disponibilidad, muestran que el nivel crítico tiende a ser más alto en suelos con una alta razón CICE/(Arcilla+óxidos de Al y Fe poco cristalinos). La explicación de este hecho puede ser el que el método de Mehlich 3 tiende a sobrestimar el P disponible en suelos ricos en bases y pobres en arcilla y óxidos de Al y Fe de baja cristalinidad, y a infraestimarlos en los suelos de propiedades opuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. y ALVAREZ, E.; 2004. Efecto de las propiedades de algunos Entisoles e Inceptisoles del occidente asturiano en la disponibilidad del fosfato aplicado. *En: B. García Criado, A. García Ciudad, B.R. Vázquez de Aldana y I. Zabalgogezcoa (eds.), Acta de la XLIV Reunión Científica de la SEEP: 547-551. Salamanca.*
- ÁLVAREZ, E.; MARTÍNEZ, A. & CALVO, R.; 1992. Geochemical aspects of aluminium in forest soils in Galicia (NW, Spain). *Biogeochemistry.* 16: 167-180.
- BASCOMB, C.L.; 1968. Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *J. Soil Sci.* 19: 251-268.
- BLAKEMORE, L.C.; 1978. Exchange complex dominated by amorphous material (ECDAM). *In: G.D. Smith (eds.), The Andisol Proposal: 21-22. Soil Bureau. DSIR. (New Zealand)*
- 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.
- COX, F.R.; 1996. Economic phosphorus fertilization using a lineal response and plateau function. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 531-543.
- FERNÁNDEZ MARCOS, M.L.; 1997. Evaluación en cámara de crecimiento de tres métodos de determinación de fósforo asimilable en suelos no calcáreos. *Edafología.* 3: 189-203.
- FIXEN, P.E. & CROVE, H.J.; 1990. Testing soils for phosphorus. *In: R.L. Westerman (eds.), Soil testing and plant analysis: 141-180. SSSA Book Series 3. Madison, Wisconsin (USA).*
- HOLFORD, I.C.R.; 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* 35: 227-239.
- MEHLICH, A.; 1985. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Soil Science and Plant Analysis.* 15: 1409-1416.
- 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.
- MONTERROSO, C.; FERNÁNDEZ MARCOS, M.L. & ÁLVAREZ, E.; 1996. Factors influencing phosphorus adsorption in mine soils in Galicia, Spain. *Sci. Total Environ.* 180 : 137-145.
- 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.
- SHARPLEY, A.N.; SINGH, U.; UEHARA, G. & KIMBLE, J.; 1989. Modelling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 153-158.
- SPSS, 2002. SPSS para windows, version 11.5. SPSS Inc. 1989-2002.
- TORRENT, J.; AFIF, E. & MATAR, A.; 1991. Predicting the phosphate sorption characteristics of soils of the WANA region. *In: Farm Resource Management Program (eds.), Annual Report for 1990: 105-110. ICARDA. Aleppo (Syria).*

TABLA 1. Propiedades generales de los suelos

pH ¹	CE ²	PM ₃ ³	Arcilla	MO	Fe _O ⁴	Al _O ⁴	Fe _P ⁵	Al _P ⁵	CICE ⁶	Al de cambio
	dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					---cmol _c kg ⁻¹ ---		
5,6	0,04	11	197	51	3,94	1,03	1,78	0,99	4,37	0,25
5,3	0,07	9	150	88	5,43	1,90	3,23	1,88	9,34	0,60
5,2	0,09	10	421	108	5,94	2,46	2,48	1,91	10,33	1,47
6,5	0,11	13	342	118	7,83	1,16	1,58	0,63	12,56	0,01
4,9	0,06	14	397	85	4,88	3,67	3,07	3,20	4,95	3,97
4,5	0,05	4	295	229	9,83	8,76	3,68	2,54	11,92	9,73
4,8	0,06	6	195	103	4,75	9,22	3,03	3,62	4,19	3,32
4,2	0,10	7	153	106	4,59	3,75	2,82	2,83	7,40	5,84
4,0	0,09	6	184	143	5,08	4,58	4,82	1,87	14,39	12,03
4,1	0,06	15	189	78	4,57	2,56	3,91	2,50	6,89	6,18

¹pH (H₂O) relación suelo:disolución (1:2,5); ²Conductividad eléctrica en el extracto (1:5) medida a 25° C; ³Fósforo extraíble con Mehlich 3 en el suelo inicial; ⁴Hierro y Aluminio extraíbles con oxalato amónico ácido; ⁵Hierro y Aluminio extraíbles con pirofosfato sódico; ⁶Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.

TABLA 2. Ecuación de Mitscherlich y el nivel crítico del fósforo Mehlich 3

Parámetros		Ecuación	R ²	Y	PM3 crítico
A	B				mg kg ⁻¹
0,25	0,13	Y = 0,25 (1-e ^{-0,13X})	0,91	0,20	12,25
0,46	0,11	Y = 0,46 (1-e ^{-0,11X})	0,98	0,37	14,54
0,31	0,34	Y = 0,31 (1-e ^{-0,34X})	0,88	0,25	4,84
0,88	0,09	Y = 0,88 (1-e ^{-0,09X})	0,87	0,70	17,88
0,18	0,19	Y = 0,18 (1-e ^{-0,19X})	0,86	0,14	8,47
0,33	0,26	Y = 0,33 (1-e ^{-0,26X})	0,97	0,26	6,20
0,21	0,38	Y = 0,21 (1-e ^{-0,38X})	0,89	0,17	4,23
0,12	0,19	Y = 0,12 (1-e ^{-0,19X})	0,95	0,10	8,47
0,16	0,11	Y = 0,16 (1-e ^{-0,11X})	0,83	0,13	14,63
0,13	0,15	Y = 0,13 (1-e ^{-0,15X})	0,91	0,10	10,73

TABLA 3. Coeficiente de correlación entre PM3 crítico y las propiedades del suelo. *: Significativo el nivel P<0,05; **: significativo el nivel P<0,01; ***: significativo el nivel P<0,001

Prop. Individuales	PM3 crítico	Prop. Combinadas	PM3 crítico
Arcilla (Ar)	-0,24		-0,54*

		Ar+20Al _O	
MO	-0,20	Ar+20(Al _O +Fe _O)	-0,45*
Al _O	-0,64**	Ar+20[(Al _O +Fe _O)+(Al _P +Fe _P)]	-0,54*
Fe _O	-0,01	Ar+20(Al _O -Al _P)	-0,44*
Al _P	-0,74***	CICE/Al _O +Fe _O	0,72***
Fe _P	-0,09	CICE/Al _P +Fe _P	0,62**
Al _O -Al _P	-0,49*	CICE/Ar+(Al _O -Al _P)	0,51*
Fe _O -Fe _P	-0,04	CICE/Ar+(Fe _O -Fe _P)	0,51*
CICE	0,41	CICE/Ar+(Fe _O -Fe _P)+(Al _O -Al _P)	0,52*

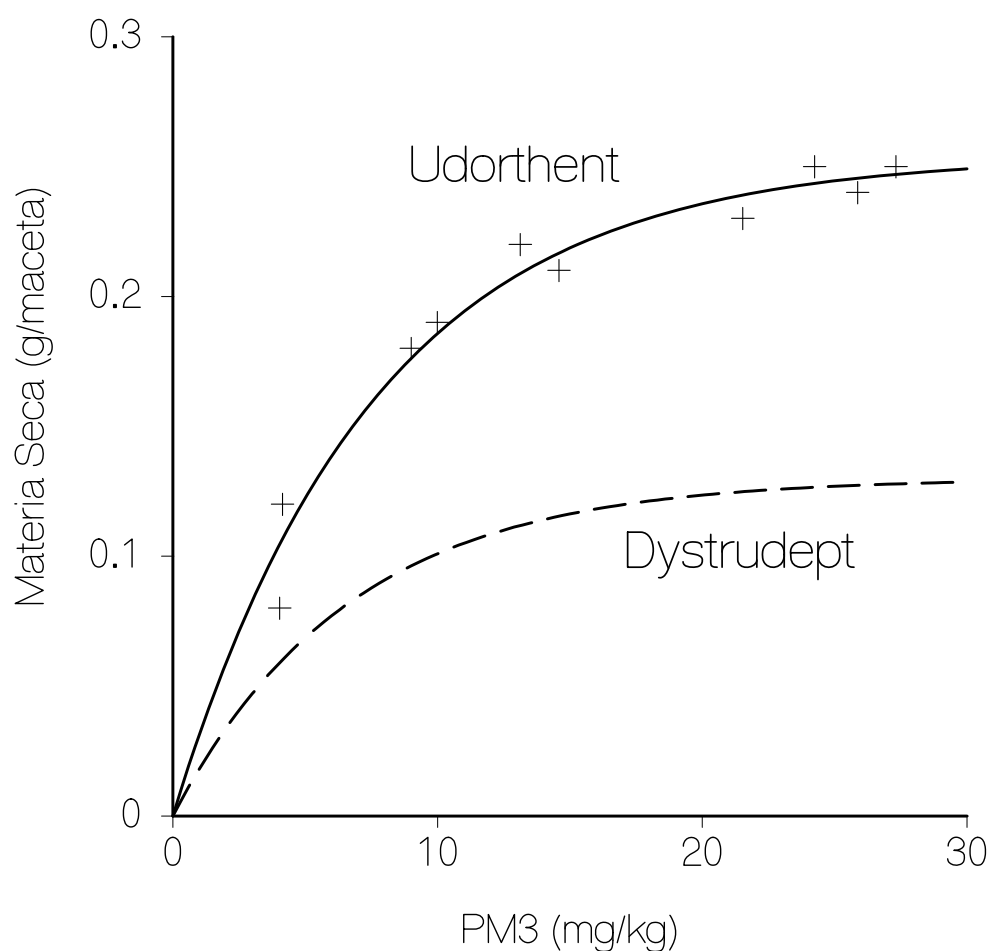


Fig. 1. Representación gráfica de los datos experimentales de dos muestras ajustadas a la ecuación simple de Mitscherlich con $R^2 = 0,91$.