

DINÁMICA DEL HIERRO Y DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO DURANTE PERÍODOS CORTOS DE ANAEROBIOSIS EN LOS SUELOS

Ferrando, M.¹, Mercado, G.¹ y Hernández, J.¹

Recibido: 26/07/01 Aceptado: 18/10/01

RESUMEN

En los suelos son frecuentes períodos cortos de anaerobiosis, los cuales determinan cambios en las formas de Fe y en la disponibilidad de P para las plantas. Durante el período de reducción del suelo, aumenta la solubilidad de los fosfatos de Fe, mientras que durante la oxidación disminuye la disponibilidad de P por retención en óxidos de Fe. El objetivo del trabajo fue evaluar la magnitud de estas variaciones durante períodos cortos de anaerobiosis, en relación con la dinámica de óxidos de Fe. En tres suelos de Uruguay, se determinó el P asimilable (Bray 1), Fe en óxidos totales (Fe_d), Fe en oxalato de amonio (Fe_{ox}), y retención de P (P_{80} : % P retenido con el agregado de 80 mg P kg⁻¹). Se colocaron 1600 g de suelo en macetas con tres regímenes hídricos [20 días a 5% por encima de C.C. (R_{105}); 20 días a 50% C.C. (R_{50}); y 20 días a 5% por encima de C.C. + 20 días a 50% C.C. ($R_{105}R_{50}$)] y dos niveles de P: testigo y 33,3 mg P maceta⁻¹, agregado al comienzo de los tratamientos R_{105} y R_{50} , o entre los períodos R_{105} y R_{50} (tratamiento $R_{105}R_{50}$). Finalizado cada régimen hídrico se sembró raigrás (*Lolium multiflorum* Lam.), evaluando la absorción de P. Luego de un período de anaerobiosis aumentó el Fe_{ox} , manteniéndose en niveles altos aun después de la oxidación del suelo. Por otra parte se observó un aumento en la disponibilidad de P, principalmente por solubilización de compuestos con Fe. El retorno de las condiciones de oxidación del suelo determinaron una disminución de los niveles de P asimilable, por retención de P en superficies de óxidos de Fe recientemente precipitados. Como consecuencia de este aumento en el grado de retención de P, su absorción por parte de la planta fue menor. Cuando existió fertilización posterior a un período de reducción, también se observó una adsorción del P del fertilizante en superficies altamente reactivas de óxidos de Fe. Los contenidos más bajos de P absorbido por las plantas se observaron en el tratamiento con exceso de agua durante 20 días, seguido de un período de oxidación.

PALABRAS CLAVE: fósforo, adsorción, oxido-reducción, óxidos de hierro

SUMMARY

IRON DYNAMICS AND PHOSPHORUS AVAILABILITY DURING SHORT PERIODS OF SOIL REDUCTION

Soils frequently have short reduction periods, in which iron forms and P availability changes. During the reduction period, the solubility of iron phosphate increase, whereas oxidation determines P adsorption on iron oxo-hydroxides, and consequently decrease P availability. The objective of this work was to evaluate the magnitude of these changes in P availability, in relation to iron oxides reactivity, after short periods of soil reduction in three uruguayan soils. We applied three hydric regimes to pots containing 1600 g of soil: (1) 20 days at 5% above Field Capacity (R_{105}); (2) 20 days with water content up to 50% of Field Capacity (R_{50}); and (3) 20 days at 5% above Field Capacity + 20 days with water content up to 50% of Field Capacity ($R_{105}R_{50}$). Phosphorus treatments (0 or 33,3 mg P pot⁻¹) were applied prior to each hydric regimes on R_{105} or R_{50} , or between periods R_{105} and R_{50} in $R_{105}R_{50}$. After each hydric regime, soil samples were analyzed for P availability (Bray 1), total Fe oxides (Fe_d), low cristallinity Fe oxides extracted with ammonium oxalate (Fe_{ox}) and P retention (P_{80} : percent of P added to soil who was sorbed, from 80 mg kg⁻¹). Subsequently, ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) seeds were sown in each pot to evaluate P uptake by plants after 45 and 69 days. During the reduction period, P availability and Fe_{ox} increased. The return of soils to oxidized conditions caused a decrease in P availability levels because of an increase in P retention by Fe oxides recently precipitated. As a results, P uptake decreased. When phosphate fertilizer was added to soil after a reduction period, P adsorption on Fe oxides was observed also. The lowest P contents in plants were observed after 20 days of reduction conditions followed by an oxidation period of 20 days (treatment $R_{105}R_{50}$).

KEY WORDS: phosphorus, adsorption, oxidation-reduction, iron oxides

¹Facultad de Agronomía. Av. E. Garzón 780. CP 12900. Montevideo. Uruguay.

INTRODUCCIÓN

Las variaciones temporales en el contenido de agua de los suelos, asociadas al régimen pluviométrico y a la presencia de un horizonte B textural de alto desarrollo, determinan alternancias en las condiciones de oxidación y reducción de los suelos. Estos cambios afectan las formas y reactividad de los compuestos de hierro del suelo, y entre ellos, los compuestos formados con el fósforo. Cuando un suelo se inunda, se establecen condiciones reductoras, las cuales determinan el pasaje de Fe^{+3} a Fe^{+2} , con lo cual aumenta la solubilidad de los compuestos del Fe con el P (Ponnamperuma, 1972). También se ha mencionado una mayor tasa de mineralización del P orgánico en estas condiciones (Harrison, 1987). Estos procesos provocan aumentos en la disponibilidad del P para las plantas (Roy y De Datta, 1985; Willet, 1989). Al retornar las condiciones de oxidación, el Fe precipita bajo la forma de óxidos de alta reactividad química, los cuales presentan una alta capacidad de reaccionar con los iones fosfato, disminuyendo su solubilidad, y por consiguiente, su disponibilidad para las plantas (Willet *et al.*, 1988). Estos autores han señalado que en suelos de arroz drenados, el Fe presente en formas de alta reactividad química (extraído con oxalato) fue quien mayoritariamente explicó la retención del P en el suelo. Los ciclos prolongados de inundación del arroz seguidos por cultivos de secano, tienen como consecuencia un incremento en la actividad del Fe en el suelo y un aumento en la retención de P (Olsen y Court, 1982). La retención de P es mayor y menos reversible bajo condiciones de inundación y secado, que bajo continua inundación del suelo (Patrick *et al.*, 1985).

Si bien estos procesos han sido estudiados principalmente en cultivos inundados como el arroz (Patrick y Mikkelsen, 1971), surgen evidencias experimentales que también muestran su importancia en suelos bajo pasturas. En situaciones donde existen problemas de drenaje asociados a la presencia de un horizonte B textural de alto desarrollo y/o posiciones topográficas planas, épocas del año con altas precipitaciones y bajas demandas atmosféricas, dicho proceso puede ser relevante (Willet y Higgins, 1980; Bradley *et al.*, 1984). También en suelos donde las condiciones predominantes son de oxidación, dentro de agregados pueden existir zonas con un ambiente reductor, en cuyas condiciones se solubilizan compuestos que migran al exterior, donde precipitan (Bradfield, 1937). Resultados de experimentos realizados en Uruguay han evidenciado variaciones estacionales en la disponibilidad de P bajo pasturas, las cuales podrían estar asociadas en parte a estos procesos (Hernández, no publicados). Sin embargo, no se conoce cómo y en qué magnitud la disponibi-

lidad de P es afectada por los diferentes factores como tipo de suelo (principalmente con relación a formas y contenidos de óxidos de Fe), alternancia de períodos de oxidación-reducción del suelo, y agregado de fertilizantes fosfatados.

El objetivo del trabajo fue estudiar la magnitud de las variaciones en la disponibilidad del P del suelo para las plantas, en relación con los cambios en la reactividad de los óxidos de Fe, luego de períodos cortos de reducción de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fueron recolectadas muestras de horizonte A (0-20 cm) de tres suelos de Uruguay de importancia en la producción de pasturas y/o rotaciones arroz-pasturas: un solod de la unidad La Charqueada LCh (Albic Natraqualf), un brunosol de la unidad Young Yg (Typic Argiudoll) y un vertisol de la unidad Itapebí-Tres Árboles I-TA (Typic Hapludert). Los datos analíticos correspondientes al horizonte A de dichos suelos se indican en el Cuadro 1.

Los suelos fueron secados al aire, molidos y tamizados a un tamaño menor a 5 mm para ser usados en los experimentos de anegamiento en invernáculo. Para los análisis de laboratorio fueron molidos a un tamaño menor a 2 mm. Se colocaron 1600 g de cada suelo en macetas, con tres tratamientos de régimen hídrico: 20 días con exceso de agua de un 5% por encima de Capacidad de Campo (R_{105}); 20 días con contenido de agua a 50% de Capacidad de Campo (R_{50}); y 20 días con exceso de agua de un 5% por encima de Capacidad de Campo, seguidos de 20 días con contenido de agua a 50% de Capacidad de Campo ($R_{105}R_{50}$). Se incluyó otra serie de tratamientos con agregado de P, en dosis equivalentes a $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ($33,3 \text{ mg P maceta}^{-1}$). La aplicación fue realizada mediante aspersión de todo el suelo (colocado en bandeja), a partir de una solución de $\text{Ca}[\text{H}_2\text{PO}_4]_2$, procurando su distribución homogénea antes de regresarlo a la maceta. El momento de aplicación fue al comienzo de cada período en los tratamientos R_{105} y R_{50} , y entre diferentes períodos de régimen hídrico en el tratamiento $R_{105}R_{50}$. El diseño experimental utilizado fue en bloques con parcelas al azar, con tres repeticiones.

Se iniciaron los tratamientos en diferentes momentos, de tal manera que todos ellos finalizaran el mismo día, en el cual se sembró raigrás (*Lolium multiflorum* Lam.) (ajustando la población mediante raleo a 10 plantas por maceta). Se realizaron dos cortes de las plantas (a los 45 y 69 días de la siembra), las cuales fueron posteriormente secadas y molidas, determinando el contenido de P en la materia seca. En la siembra, y luego del primer corte del raigrás, se agregaron 10 ml de una solución nutritiva que contenía

Cuadro 1. Características del horizonte A (0-20 cm) de los suelos estudiados.

Suelo/Unidad de mapeo*	Textura	P (Bray 1)	pH§	C orgánico	Fe _d †	Fe _{ox} ‡
		mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	
Solod La Charqueada (LCh)	Franco	7	5,9	13,0	847	1890
Brunosol Young (Yg)	Franco Arcilloso	11	5,9	39,3	675	2683
Vertisol Itapebí-Tres Árboles (I-TA)	Arcillo Limoso	17	6,1	39,8	1061	6137

* Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (MAP - DSF, 1976)

† Fe extraído con ditionito de sodio

‡ Fe extraído con oxalato de amonio 0,0175M + ác. oxálico 0,01M

§ Relación v/v Suelo:Solución 1:2,5

(por litro): 0,80 mg de CuSO₄, 14,85 mg de (NH₄)₂Fe(SO₄)₂·6H₂O, 4,92 mg de MnSO₄·H₂O, 4,22 mg de ZnSO₄·7H₂O, 0,36 mg de H₃BO₃, 20,19 mg de (NH₄)₂SO₄, 344,79 mg de KNO₃ y 356,31 mg de NH₄NO₃. Al final de cada período de humedad se tomaron muestras de suelo, las cuales se mantuvieron a humedad de muestreo en bolsas de polietileno a 4°C hasta el momento del análisis.

Los análisis de caracterización inicial de los suelos (cuadro 1), fueron realizados sobre muestras secadas al aire, molidas y tamizadas a 2 mm. Las restantes determinaciones se efectuaron sobre muestra húmeda, manteniendo la relación suelo:solución mediante corrección por el contenido de humedad. Los métodos utilizados fueron: P asimilable por el método Bray N°1 (Bray y Kurtz, 1945); Fe total de óxidos (Fe_d), mediante una extracción con ditionito de sodio (Kilmer, 1960); Fe en óxidos de baja cristalinidad (Fe_{ox}), mediante una extracción con oxalato de amonio 0,0175M (Ferrando y Mercado, 1997). Se calculó el Índice de Actividad (IA), definido como la relación Fe_{ox}/Fe_d. Se evaluó la retención de P por parte de los diferentes suelos y tratamientos hídricos, equilibrando durante 16 horas 2,5 g de suelo con 20 mL de soluciones de CaCl₂ 0,01M que contenían 10, 15, 25, 40, 60 y 100 mg P L⁻¹, equivalentes a 80, 120, 200, 320, 480 y 800 mg P kg⁻¹ de suelo respectivamente. Previo agitado se agregaron unas gotas de tolueno para inhibir la microflora. Las suspensiones fueron centrifugadas, determinando el P remanente en la solución, calculando posteriormente el P retenido en la fase sólida por diferencia con el P agregado. Se ajustó el modelo de Langmuir a los datos obtenidos para cada suelo y régimen hídrico, de acuerdo a la fórmula:

$$c/(x/m) = 1/Kb + c/b$$

donde: x/m es el P adsorbido por unidad de peso, c es la concentración de P en la solución de equilibrio, b es el máximo de adsorción, y K es la constante relacionada con la energía de adsorción.

Se determinó un índice de retención de P (P₈₀), como el porcentaje del P agregado al suelo que fue adsorbido por la fase sólida, con el agregado de 80 mg P kg⁻¹ de suelo.

Se calculó la Eficiencia de Uso del P agregado para cada suelo y régimen hídrico, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$100(F-SF)/A$$

donde: F es el P total absorbido por las plantas en el tratamiento fertilizado, SF es el P total absorbido por las plantas en el tratamiento sin fertilizar, y A es el P agregado como fertilizante.

Los análisis estadísticos fueron realizados mediante los procedimientos PROC GLM y PROC CORR del SAS (SAS Institute, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Formas y contenidos de Fe

Los suelos estudiados presentaron diferencias en los contenidos totales de hierro en óxidos (Fe_d), así como en su proporción bajo formas de alta reactividad (Fe_{ox}). De los tres suelos estudiados, se destaca el alto contenido de Fe total en óxidos del vertisol de la unidad Itapebí-Tres Árboles, desarrollado a partir de materiales con influencia de basalto (Cuadro 2). Similares resultados fueron ya encontrados por varios autores para otros suelos derivados de basalto (Cayssials y Puentes, 1974; Escudero y Morón,

Cuadro 2. Contenidos promedio de Fe en óxidos de baja cristalinidad (Fe_{ox}), Fe total en óxidos (Fe_d) e Índice de Actividad ($\text{Fe}_{\text{ox}}/\text{Fe}_d$) para los tres suelos y regímenes hídricos.

Suelo	Régimen hídrico†	Fe_{ox}	Fe_d	Índice de Actividad
-----mg kg ⁻¹ -----				
Solod La Charqueada (LCh)	R_{50}	847c‡	1890a	0,45a
	R_{105}	1277a	2380a	0,55a
	$R_{105}R_{50}$	1088b	2543a	0,46a
Brunosol Young (Yg)	R_{50}	675b	2683a	0,25a
	R_{105}	839a	2987a	0,28a
	$R_{105}R_{50}$	801a	2753a	0,29a
Vertisol Itapebí-Tres Árboles (I-TA)	R_{50}	1061a	6137a	0,17a
	R_{105}	1044a	5903a	0,18a
	$R_{105}R_{50}$	1332a	6440a	0,21a

† Contenido de agua de los suelos:

 R_{105} : 5% por encima de Capacidad de Campo $R_{105}R_{50}$: 5% por encima de Capacidad de Campo - secado y mantenido a 50% de Capacidad de Campo R_{50} : 50% de Capacidad de Campo‡ Medias seguidas por la misma letra dentro de cada suelo y dentro de cada columna no son significativamente diferentes ($P < 0,05$) de acuerdo a MDS.

1976; Hernández *et al.*, 1995). No obstante, dicho suelo presentó los valores más bajos de Índice de Actividad (IA), lo cual está indicando una baja proporción de Fe en formas de baja cristalinidad. Un comportamiento inverso fue observado en el solod de la unidad La Charqueada, con menores contenidos totales de Fe en óxidos, pero con un alto porcentaje en formas de baja cristalinidad. Esto tendría su explicación en el hecho de ser un suelo que ocupa posiciones planas del paisaje, donde ocurren períodos frecuentes con exceso de agua, los cuales determinan alternancias en las condiciones de oxidación-reducción. Estas condiciones dificultan la cristalización de los óxidos de Fe, lo que determina su baja estabilidad y cristalinidad (Kämpf, 1988).

Las variaciones en el régimen hídrico de los suelos determinaron cambios en las variables Fe_{ox} y Fe_d . Se observó un aumento significativo en el Fe_{ox} para los suelos de las unidades LCh y Yg cuando estuvieron sometidos a un período de exceso de agua durante 20 días (tratamientos R_{105} y $R_{105}R_{50}$). En el vertisol de la unidad I-TA las diferencias no fueron significativas, lo cual corroboraría la mayor estabilidad de los óxidos de Fe presentes. Los mayores cambios fueron observados en el solod de la unidad LCh donde además de aumentar el contenido de Fe_{ox} se observó cierta tendencia al aumento en el Fe_d y el IA. Este aumento en las formas de baja cristalinidad, cuando ocurren

condiciones de exceso de agua en los suelos, ha sido mencionado por varios autores (Khalid *et al.*, 1977; Willett *et al.*, 1978; Holford y Patrick, 1981; Hernández y Meurer, 1998). Las condiciones de anaerobiosis determinan la reducción del Fe, con lo cual aumenta su solubilidad.

El retorno de las condiciones de oxidación en el suelo (tratamiento $R_{105}R_{50}$) generó una disminución en el contenido de Fe_{ox} , en el solod LCh. El IA de los tratamientos R_{105} y $R_{105}R_{50}$ no mostró diferencias significativas, lo cual indicaría que los óxidos de Fe recientemente formados mantendrían sus características de baja cristalinidad aun después de un período de tiempo bajo condiciones predominantes de oxidación. Los períodos alternados de reducción y oxidación del suelo dan lugar al aumento de los óxidos de hierro finamente divididos, de baja cristalinidad (Blume, 1988; Munch *et al.*, 1978), metaestables (van Breemen, 1988), con una gran área de superficie (Kuo y Mikkelsen, 1979).

P asimilable

En el Cuadro 3 se indican los valores de P asimilable para los diferentes tratamientos de régimen hídrico en los tres suelos estudiados, con y sin agregado de fertilizante. Con la excepción del vertisol I-TA, en los tratamientos sin agregado de fertilizante, luego de un período de exceso de agua (R_{105}) se observó un aumento significativo en los

Cuadro 3. Niveles promedio de P asimilable al final de cada régimen hídrico para los tres suelos con y sin fertilización.

Suelo	Régimen hídrico†	P asimilable (Bray 1)		
		Sin fertilizar (SF)	Fertilizado (F)	Diferencia (F - SF)
-----mg kg ⁻¹ -----				
Solod La Charqueada (LCh)	R ₅₀	7,3b‡	17,9a	10,6b
	R ₁₀₅	12,3a	18,0a	16,7a
	R ₁₀₅ R ₅₀	3,5c	14,2b	10,7b
Brunosol Young (Yg)	R ₅₀	10,7b	29,0a	18,3a
	R ₁₀₅	14,2a	28,8a	14,6b
	R ₁₀₅ R ₅₀	6,7c	22,4b	15,7b
Vertisol Itapebí-Tres Árboles (I-TA)	R ₅₀	16,9a	30,1a	13,2a
	R ₁₀₅	16,6a	29,6a	13,0a
	R ₁₀₅ R ₅₀	9,8b	24,3b	14,5a

† Contenido de agua de los suelos:

R₁₀₅: 5% por encima de Capacidad de CampoR₁₀₅R₅₀: 5% por encima de Capacidad de Campo - secado y mantenido a 50% de Capacidad de CampoR₅₀: 50% de Capacidad de Campo

‡ Medias seguidas por la misma letra dentro de cada suelo y dentro de cada columna no son significativamente diferentes (P<0,05) de acuerdo a MDS.

niveles de P asimilable, respecto a la situación donde el suelo nunca fue inundado (R₅₀). Dicho proceso estaría explicado por el aumento en la solubilidad de los compuestos del Fe ligados al P, como consecuencia de la reducción de Fe⁺³ a Fe⁺² (Savant y Ellis, 1964; Willett, 1989). Se encontró una correlación significativa entre los aumentos en el P asimilable y el incremento en los niveles de Fe_{ox} (r = 0,851; P = 0,004). Por otra parte, según varios autores (De Datta, 1975; Goswami y Banerjee, 1978; Ponnampereuma, 1978), durante el período de anaerobiosis también se favorece la mineralización de formas orgánicas de P y el aumento en la solubilidad de los compuestos fosfatados de Al, como consecuencia del aumento en el pH.

Luego del período con exceso de agua, cuando el suelo se secó hasta un contenido del 50% de Capacidad de Campo (R₁₀₅R₅₀), se observó una disminución significativa en los valores de P asimilable, a niveles aún por debajo de los iniciales antes de inundar. Con el retorno de las condiciones de oxidación, se produciría la reprecipitación del Fe bajo la forma de partículas con mayor área de superficie (cristales más pequeños y desordenados) y mayor reactividad química por aniones como el fosfato (Kuo y Mikkelsen, 1979). Esto determina un mayor grado de retención de P, comparado con la situación previa a la inun-

dación. Se realizó el análisis estadístico de los datos de retención de P, utilizando un modelo mixto que tenía como variables clasificatorias suelo y régimen hídrico, y como variable continua el P en solución. Fueron encontradas diferencias significativas en el grado de retención de P, para las tres variables y para la interacción Suelo*P en solución (Cuadro 4). En la Figura 1 se indica la alta relación encontrada entre las formas más activas de Fe (Fe_{ox}) y la adsorción de P, evaluada por medio del índice P₈₀. Como consecuencia de este aumento en el grado de retención de fosfatos, la disponibilidad de P disminuyó. En la Figura 2 se observa esta disminución en función del aumento en el grado de reactividad de los óxidos de Fe (evaluado mediante el IA), para los tratamientos R₅₀ y R₁₀₅R₅₀. El tratamiento R₁₀₅ no fue considerado pues, si bien tiene un alto índice de actividad, por estar el suelo inundado, el P está menos sujeto a la retención por el Fe⁺², quedando bajo forma de compuestos más solubles.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en otros trabajos realizados sobre suelos del Uruguay (Hernández, 1996), y los obtenidos por Willett *et al.*, (1978), quienes vieron que el Fe extraído con oxalato fue la principal propiedad que determinó la retención del P en el suelo.

Cuadro 4. Resultados del análisis de varianza para la retención de P por los tres suelos y los tres regímenes hídricos. El modelo ajustado considera como variables clasificatorias suelo y régimen hídrico, y variable continua el P en solución.

Fuente de Variación	Cuadrado medio	Valor de F	Pr > F
Suelo	0,01176366	142,35	0,0001
Régimen hídrico	0,00067029	8,11	0,0001
P en solución	0,08225241	995,32	0,0001
Suelo*P en solución	0,00124015	15,01	0,0001

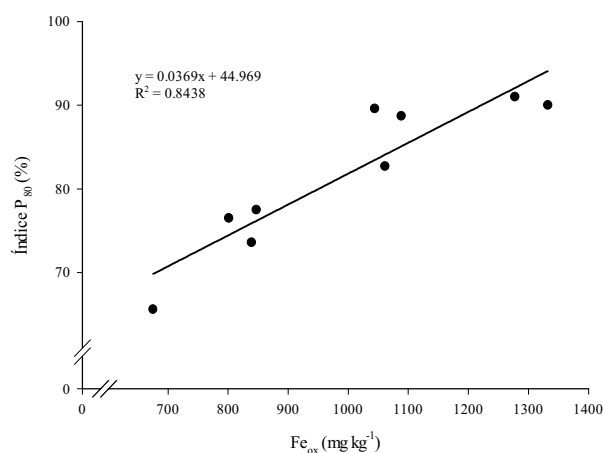


Figura 1. Relación entre el Fe extraído por oxalato (Fe_{ox}) y un índice de retención de P (P_{80} : porcentaje del P agregado al suelo que fue absorbido, con el agregado de 80 mg kg^{-1}).

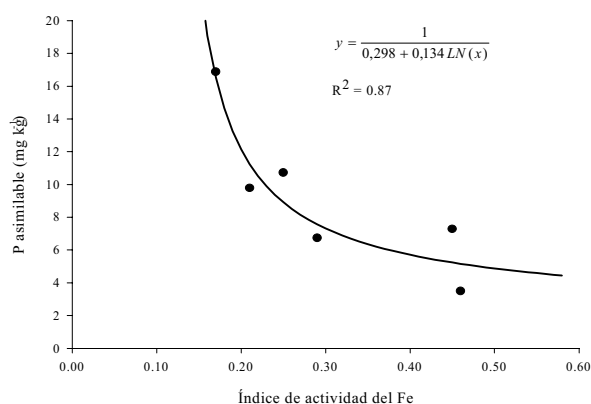


Figura 2. Relación entre el Índice de Actividad (Fe_{ox}/Fe_d) y el P asimilable (Bray 1) de los suelos para los tratamientos R_{105} , R_{50} y R_{50} sin fertilización previa.

La fertilización fosfatada aumentó los niveles de P asimilable en los suelos (Cuadro 3). No obstante, el incremento fue diferente para los tres suelos, siguiendo el orden $Yg > I-TA > LCh$. El menor incremento logrado en el solod LCh podría estar explicado por una mayor retención de P, al tener una mayor proporción de óxidos de Fe de alta reactividad química. Los niveles más bajos de P asimilable se encontraron cuando el fertilizante fue agregado a posteriori de un período de exceso de agua y previo al secado del suelo (R_{105} , R_{50}). Esto indica una adsorción del P del fertilizante en las superficies altamente reactivas de óxidos de Fe recientemente precipitados.

P absorbido por las plantas

Los contenidos de P en las plantas mostraron diferencias entre suelos y en función del régimen hídrico previo (Cuadro 5).

En el tratamiento sin fertilizar con exceso de agua durante 20 días, seguido de un período de oxidación fue donde se observaron los contenidos más bajos de P absorbido, lo cual guarda relación con lo observado en cuanto a una menor disponibilidad de P en el suelo. La absorción de P por las plantas que crecieron en el suelo inmediatamente después de un período de inundación no mostró diferencias significativas con el tratamiento donde el suelo permaneció bajo condiciones de oxidación. En el tratamiento R_{105} , si bien al momento del muestreo presentó un mayor nivel de P en el suelo, las condiciones de oxidación posteriores a la siembra determinaron una disminución de la misma, lo cual es explicado por los niveles de P absorbido por las plantas en comparación con el tratamiento R_{50} .

Las plantas de los tratamientos con el agregado de fertilizante mostraron un comportamiento similar, en cuanto a una menor absorción de P cuando el fertilizante fue agregado inmediatamente a continuación de un período de exceso de agua, y con posterior secado del suelo (tratamientos R_{105} y R_{105} - R_{50}). Esto está de acuerdo con lo ya observado

Cuadro 5. P absorbido por plantas de raigrás sembradas al final de los tres regímenes hídricos en los tres suelos con y sin fertilización.

Suelo	Régimen hídrico†	P absorbido		
		Sin fertilizar (SF)	Fertilizado (F)	Eficiencia de uso
		-----maceta ⁻¹ -----		
Solod La Charqueada (LCh)	R ₅₀	5,18a‡	12,19a	21a
	R ₁₀₅	3,72a	9,93bc	19a
	R ₁₀₅ R ₅₀	1,59b	9,63c	24a
Brunosol Young (Yg)	R ₅₀	9,83ab	23,11a	40a
	R ₁₀₅	10,73a	19,48bc	26bc
	R ₁₀₅ R ₅₀	6,52b	17,36c	33c
Vertisol Itapebí-Tres Árboles (I-TA)	R ₅₀	11,63a	18,87a	22a
	R ₁₀₅	13,12a	15,55b	7a
	R ₁₀₅ R ₅₀	9,16a	16,11ab	21a

† Contenido de agua de los suelos:

R₁₀₅: 5% por encima de Capacidad de CampoR₁₀₅R₅₀: 5% por encima de Capacidad de Campo - secado y mantenido a 50% de Capacidad de CampoR₅₀: 50% de Capacidad de Campo

‡ Medias seguidas por la misma letra dentro de cada suelo y dentro de cada columna no son significativamente diferentes (P<0,05) de acuerdo a MDS.

anteriormente en cuanto a niveles más bajos de disponibilidad de P en el suelo. La eficiencia de uso aparente del P agregado fue menor en el tratamiento R₁₀₅, por una mayor disponibilidad de P del suelo con relación al tratamiento R₁₀₅R₅₀.

CONCLUSIONES

La ocurrencia de períodos cortos y frecuentes de anaerobiosis en los suelos condujeron a variaciones en la disponibilidad de P. Durante el período de exceso de agua de los suelos se establecieron condiciones reductoras, las cuales determinaron un aumento en los contenidos y proporciones de óxidos de Fe de baja cristalinidad (Fe_{ox}). Luego de la oxidación del suelo, dichos niveles se mantuvieron altos, lo que indicaría su permanencia bajo formas poco cristalinas durante las condiciones de oxidación posteriores.

En la etapa de reducción del suelo, se observó un aumento en los niveles de P asimilable de los suelos, en relación con el aumento de solubilidad de los compuestos con Fe por reducción a Fe⁺². El retorno de las condiciones de

oxidación, determinó una disminución en dichos niveles, a valores aun por debajo de los iniciales antes de inundar. Esto surge como consecuencia de la re-adsorción del P en superficies de óxidos de Fe recientemente precipitados. El aumento en el IA del Fe estuvo asociado a esta disminución en los niveles de P asimilable de los suelos. Esta menor disponibilidad de P fue también evidenciada en menores contenidos de P en planta, respecto a las situaciones donde no hubo exceso de agua previo.

El agregado de un fertilizante fosfatado a posteriori de un período de exceso de agua mostró una pérdida de asimilabilidad del P agregado por adsorción del P del fertilizante en las superficies altamente reactivas de óxidos de Fe recientemente precipitados. Esto fue constatado por una menor absorción de P por las plantas.

Los resultados obtenidos confirmarían la importancia de los cambios en la reactividad del Fe de los suelos, frente a oscilaciones periódicas en las condiciones de oxidación-reducción. La disponibilidad de P en los suelos puede mostrar variaciones a lo largo del año, las cuales no sólo estarán restringidas a suelos de posiciones topográficas planas.

BIBLIOGRAFÍA

- BLUME, H.P. 1988. The fate of iron during soil formation in humid-temperate environments. In: STUCKI, J.W. *et al.*, (Eds.) *Iron in Soils and Clay Minerals*. Dordrecht, D. Reidel. cap 21. p.749-777.
- BRADFIELD, H. 1937. Soil conservation from the viewpoint of soil physics. *J. Am. Soc. Agron.* 29: 85-92.
- BRADLEY, J.; VIMPANY, I.; NICHOLLS, P.J. 1984. Effects of water logging and subsequent drainage of a pasture soil on phosphate sorption, extractable phosphate and oxalate-extractable iron. *Aust. J. Soil.* 22:455-461.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- CAYSSIALS, R.; PUENTES, R. 1974. Determinación y fraccionamiento de hierro y aluminio libre en algunos suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 88p.
- DE DATTA, S.K. 1975. Fertilizantes y acondicionamiento del suelo para el arroz tropical. In Universidad de Filipinas. Escuela de Agricultura. Cultivo del arroz. Manual de producción. México. Limusa. Pp 139-174.
- ESCUADERO, J.; MORON, A. 1978. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de distintos suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 100p.
- FERRANDO, M.; MERCADO, G. 1997. Efecto de períodos alternados de exceso de agua y secado de los suelos en la disponibilidad de fósforo. Tesis Ing. Agr. Mdeo., Uruguay. Fac. Agronomía, 1977. 83 p.
- GOSWAMI, N.N. and BANERJEE, N.K. 1978. Phosphorus, potassium and other macroelements. In International Rice Research Institute. *Soils and Rice*. Los Baños, Philippines. pp. 562-580.
- HARRISON, A.F. 1987. *Soil Organic Phosphorus*. CAB International. Wallingford, United Kingdom 257p.
- HERNANDEZ, J. 1995. Dinâmica de fósforo em alguns solos de Uruguai afetada pela variação temporal nas condições de oxidação-redução. Tesis M.Sc. Porto Alegre, Brasil, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 173p.
- HERNÁNDEZ, J.; E. MEURER. 1998. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em solos do Uruguai. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 22: 223-230.
- HERNANDEZ, J.; OTEGUI, O.; ZAMALVIDE, J.P. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía, Montevideo. Boletín de Investigaciones N° 43. 32p.
- HOLFORD, I.C.R.; PATRICK JUNIOR, W.H. 1981. Effects of duration of anaerobiosis and reoxidation on phosphate sorption characteristics of an acid soil. *Aust. J. Soil Res.* 19:69-78.
- KAMPF, N. 1988. O ferro no solo. In Anais da Reunião sobre ferro em solos inundados (1ª, Goiânia, Go). Actas. Goiânia, Embrapa-CNPAP. pp.35-71.
- KHALID, R.A.; PATRICK, W.H.; DE LAUNE, R.D. 1977. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:305-310.
- KILMER, V. 1960. The estimation of free iron oxides in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:420-421.
- KUO, S.; MIKKELSEN, D.L. 1979. Distribution of iron and phosphorus in flooded and unflooded soil profiles and their relation to phosphorus adsorption. *Soil Sci.* 127:18-25.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA - DIRECCIÓN DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay, v.1 y v.3.
- MUNCH, J.C.; HILLEBRAND, T.H.; OTTOW, J.C.G. 1978. Transformations in the Feo/Fed ratio of pedogenic iron oxides affected by iron-reducing bacteria. *Can. J. Soil Sci.* 58:475-486.
- OLSEN, R.G.; COURT, M.N. 1982. Effect of wetting drying of soils on phosphate adsorption and resin extraction of soil phosphate. *J. Soil Sci.* 33:709-717.
- PATRICK JUNIOR, W.H.; MIKKELSEN, D.S. 1971. Plant nutrient behavior in flooded soil. In: Olson, ed. *Fertilizer technology and use*. 2nd ed. Madison, Wis., Soil Science Society of America. pp.187-215.
- PATRICK JUNIOR, W.H.; MIKKELSEN, D.S.; WELLS, B.R. 1985. Plant nutrient behavior in flooded soil. In Engelstad, O.P. eds. *Fertilizer Technology and Use* 3th Edition. Madison, Wis., Soil Science Society of America. pp. 197-228.
- PONNAMPERUMA, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24:29-96.
- PONNAMPERUMA, F.N. 1978. Electrochemical changes in submerged soil and growth of the rice. In International Rice Research Institute. *Soils and Rice*. Los Baños, Philippines. pp.562-580.
- ROY, A.C.; DE DATTA, S.K., 1985. Phosphate sorption isotherms for evaluating phosphorus requirement of wetland rice soils. *Plant and Soils* 86:185-196.
- SAS Institute, Inc. 1985. *SAS User's Guide: Statistics*. Cary, NC. 378p.
- SAVANT, N.K.; ELLIS Jr., R.L. 1964. Changes in redox potential and phosphorus availability in submerged soils. *Soil Sci.* 98:388-394.

- VAN BREEMEN, N. 1988. Long-term chemical, mineralogical, and morphological effects of iron-redox processes in periodically flooded soils. In: STUCKI, J.W. *et al.*, (Eds.) Iron in Soils and Clay Minerals. Dordrecht, D. Reidel. p.811-823.
- WILLETT, I.R. 1989. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding. Aust. J. Soil Res. 27:45-54.
- WILLETT, I.R.; HIGGINS, M.L. 1978. Phosphate sorption by reduced and reoxidized rice soils. Aust. J. Soil Res. 16: 319-326.
- WILLETT, I.R.; HIGGINS, M.L. 1980. Phosphate sorption and extractable iron in soils during irrigated rice-upland crop rotations. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. 20:346-353.
- WILLETT, I.R., CHARTRES, C.J.; NGUYEN, T.T. 1988. Migration of phosphate into aggregated particles of ferrihydrite. J. Soil Sci. 39:275-282.