



Fertilización de pasturas de leguminosas: resultados para el manejo del fósforo y el azufre.

Enero, 2019

SERIE
TÉCNICA

248

INIA

FERTILIZACIÓN DE PASTURAS DE LEGUMINOSAS: RESULTADOS PARA EL MANEJO DEL FÓSFORO Y EL AZUFRE

Editores: Andrés Quincke¹ y Robin Cuadro²

¹ Ing. Agr. PhD. Andrés Quincke. Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

² Ing. Agr. Robin Cuadro. Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

Título: Fertilización de pasturas de leguminosas: resultados para el manejo del fósforo y el azufre.

Editores: Andrés Quincke y Robin Cuadro

Serie Técnica N° 248

ISBN: 978-9974-38-416-3

© 2019, INIA

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA
Andes 1365, Piso 12. Montevideo, Uruguay.
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

D.M.T.V., Ph.D. José Luis Repetto - Presidente

Ing. Agr., Mag. Mariana Hill - Vicepresidenta



Ing. Agr. Jaime Gomes de Freitas

Ing. Agr. Jorge Peñagaricano



Ing. Agr. Pablo Gorriti

Ing. Agr. Alberto Bozzo



CONTENIDO

	Página
Prefacio	i
Agradecimientos	ii
Capítulo 1. Introducción y metodología general Quincke, A.; Cuadro, R.; Giorello, D.; Bermúdez, R.....	1
Capítulo 2. Estimación de umbrales críticos de P extractable en suelo para Trébol blanco y Lotus corniculatus Cuadro, R., Quincke, A., Giorello, D., Bermúdez, R.....	15
Capítulo 3. Relación entre fósforo agregado y fósforo extractable en pasturas de trébol blanco y Lotus corniculatus instaladas sobre distintos suelos Quincke, A.; Cuadro, R.; Giorello, D.; Bermúdez, R.	25
Capítulo 4. Eficiencia relativa de la fertilización con fosforita natural respecto a superfosfato Quincke, A, Cuadro, R, Giorello, D., Bermúdez, R.....	33
Capítulo 5. Variación del P extractable por variación del contenido hídrico del suelo Quincke, A.....	39
Capítulo 6. Efecto del agregado de azufre en la productividad de pasturas de trébol blanco Cuadro, R.; Quincke, A.; Giorello, D.; Bermúdez, R.	49

Prefacio

La implantación y producción exitosa de leguminosas en nuestras pasturas, -ya sea como mejoramientos de campo natural o pasturas cultivadas-, requiere de atender cuidadosamente un conjunto de aspectos de manejo. Uno de estos aspectos es asegurar una adecuada disponibilidad de nutrientes en el suelo. Este es precisamente el tema de la presente publicación, en la que el mayor énfasis está puesto en el fósforo y en menor medida en el azufre.

Como es sabido, la importancia crítica del manejo de la fertilización fosfatada está dada por la conocida baja disponibilidad de este nutriente en nuestros suelos. Afortunadamente, desde la primera guía de fertilización de pasturas del año 1976, los técnicos asesores y productores avanzados reconocen la importancia del análisis de suelos para la correcta toma de decisiones. No obstante, a partir de las investigaciones conducidas durante las subsiguientes décadas, se reconoció la necesidad de ofrecer pautas y recomendaciones que estuvieran actualizadas respecto a las tecnologías de manejo y fertilización, y a la vez contemplando la reconocida variabilidad de suelos que caracteriza a nuestro país.

En los últimos años también ha ocurrido una muy importante preocupación por el medio ambiente, especialmente por la comprobada relación entre el enriquecimiento en fósforo en las aguas superficiales y la consecuente pérdida de calidad de las mismas. Por esta razón, tanto a nivel mundial como nacional se reconoce la importancia de manejar este nutriente con mucha atención y responsabilidad en la producción agropecuaria, haciendo imperiosa la necesidad de evitar dosis que exceden las necesidades del cultivo.

La presente publicación tiene como base un trabajo experimental coordinado entre tres regionales de INIA (Treinta y Tres, Tacuarembó y La Estanzuela) y comprendiendo 14 sitios experimentales en distintos tipos de suelos del país.

En nombre del equipo de trabajo estamos agradecidos por el apoyo recibido. A los productores y a las instituciones que dispusieron de sus campos para nuestros sitios experimentales; a la empresa ISUSA por su apoyo económico; y a los asesores técnicos y productores por su interés en incorporar mejoras en sus sistemas de producción.

Andrés Quincke, Ing. Agr., PhD.
Robin Cuadro, Ing. Agr.

Agradecimientos

Muchas personas, desde distintos roles, han contribuido en diferentes etapas del proceso de este trabajo.

A propietarios de campos en los que se instalaron los sitios experimentales: Sociedad de Fomento de Flores (Trinidad), Asociación de Productores de Leche de Florida, Sociedad Rural de Río Negro (Young), Escuela Agraria La Carolina, Luna Marina S.A. (Palmitas), Arnoldo Rochón (Ombúes de Lavalle), Héctor Rubio (Pan de Azúcar), Ernesto Stirling (Rincón de Ramírez), Gustavo Silvera (Isla Patrulla), Luis Tuneu (Tambores), J. Martín Berrutti (Tres Puentes), Daniel Furtado (Sauce Cañote).

A los equipos de apoyo de las regionales de INIA de Tacuarembó, Treinta y Tres y La Estanzuela. Del mismo modo, al laboratorio de Suelos. Planta y Agua de La Estanzuela.

A Fernando Lattanzi, actual director del Programa de Pasturas y Forrajes. A Mónica Rebuffo y Walter Ayala, directores anteriores de este programa. A Alejandro Morón como autor intelectual del proyecto y líder del equipo de investigación en etapas experimentales. A Virginia Pravia como integrante de dicho equipo y a Diego Riso y Francisco "Paco" Formoso por su apoyo en dichas etapas más tempranas.

A Juan Molfino por su apoyo en la selección y caracterización de los sitios experimentales. A Fernando García y Alejandro Morón por sus aportes como editores técnicos de las versiones iniciales de este trabajo.

A la empresa ISUSA por el apoyo en la co-financiación del proyecto.

1. Introducción y metodología general

Quincke, A.¹; Bermúdez, R.²; Cuadro, R.³; Giorello, D.³

La competitividad de la producción de carne y leche de Uruguay se basa en gran medida en la rentabilidad del sistema pastoril. A su vez, es ampliamente conocido que se necesita contar con especies leguminosas forrajeras para aumentar la producción de forraje, tanto en cantidad como en calidad, y así lograr intensificar la producción pecuaria (MGAP, 1987). Sin embargo, los suelos del Uruguay son naturalmente deficientes en su capacidad de suministro de fósforo (P) (Morón, 2008, Barbazán *et al.*, 2007) y, por lo tanto, el fertilizante fosfatado es un insumo central en pasturas a base de leguminosas. Por ello, la fertilización fosfatada es un pilar fundamental en la productividad ganadera. Además, en condiciones de alta producción de forraje en base a leguminosas, el azufre (S) también puede ser limitante. Por ejemplo esto ha sido comprobado para el caso de trébol blanco en Nueva Zelanda (Sinclair *et al.*, 1996) y para el caso de Uruguay también hay estudios que muestran la potencial deficiencia de S en esta especie (Morón, 2008).

ANTECEDENTES

Una primera síntesis de la información generada sobre fertilización de pasturas con P en el país fue presentada en la “Guía de Fertilización de Pasturas” de 1976 por Castro *et al.*, pertenecientes a la Estación Experimental La Estanzuela (Centro de Investigaciones Agrícolas “Alberto Boerger”). Originalmente fue una publicación mimeografiada y finalmente se publicó formalmente en 1981 (Castro *et al.*, 1981). Dicha Guía de Fertilización se basó en el método de análisis de resinas de intercambio catiónico para determinar el P disponible o extractable en el suelo, toman-

do la muestra a una profundidad de 0-15 cm. Estos autores recomiendan el manejo de la fertilización fosfatada tomando en cuenta tres parámetros: el equivalente fertilizante (EF), la tasa de descenso (TD) y los niveles mínimos y máximos de P extractable recomendados. Estos niveles se definieron como orientación para lograr una buena implantación y sobrevivencia de las leguminosas, y hasta un 90% del rendimiento máximo alcanzable. Además, reconociendo la variabilidad edáfica de los suelos de Uruguay desde el punto de vista de la dinámica del P, los autores propusieron las siguientes tres categorías de suelos: el Grupo I, comprendiendo suelos de textura pesada con pH mayor a 5.7, como Brunosoles éutricos y Vertisoles sobre Libertad, Fray Bentos, Basalto, etc.; el Grupo II, incluyendo suelos de textura media con pH entre 5.5 y 6.0, como Brunosoles subéutricos y Litosoles sobre Cristalino, Argisoles sobre Cretáceo sur, etc.; y el Grupo III, de suelos de textura liviana con pH menor 5.6, como Argisoles y Planosoles de Tacuarembó, Cretáceo, Yaguarí, etc. En estudios previos a la Guía de 1976, Zamuz y Castro (1974) y luego Zamalvide *et al.* (1978) evaluaron diferentes métodos para determinar la disponibilidad de P en distintos suelos y con fuentes de P contrastantes.

Luego de la Guía de 1976 se sucedieron diversos trabajos que proveyeron nueva información, con la cual se propusieron ajustes y se realizaron revisiones (Mallarino y Casanova, 1984; Morón, 1984). Estos trabajos también permitieron concluir que el método Bray I se adapta a la mayoría de los suelos de uso agrícola del país, además de que es un método muy aceptado a nivel mundial. Como resultado, el método Bray I es el mé-

¹ Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

² Ing. Agr. MPhil., hasta 2015 Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Treinta y Tres.

³ Ing. Agr., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

todo más comúnmente utilizado en nuestro país (Bordoli, 2003). Sin embargo, también se fueron reportando problemas con los métodos de análisis, tanto con el Bray I, como con el de resinas. Por ejemplo, para el caso de Basalto, Morón (2007) determinó que luego de un año de fertilizar con fosforita o con superfosfato triple, el P extractable por el método de resinas era más alto que los niveles esperables según la Guía de 1976. Por otro lado, en un suelo de Cristalino en Cerro Colorado, Morón (2007) observó que el P extractable por el método de resinas era más bajo que lo esperable según la Guía de 1976, es decir opuesto al caso de Basalto. También Bordoli (2003) concluye que el método Bray I requeriría una calibración diferente para suelos arenosos y suelos con alta actividad de carbonato de calcio. Para suelos formados sobre Basalto el método Bray I ha mostrado baja sensibilidad para detectar diferencias en disponibilidad, indicando que este método no se adaptaría a este tipo de suelos (Bordoli, 2003).

El manejo de la fertilización fosfatada también implica la elección del tipo de fertilizante o "fuente" de P a utilizar. La fosforita natural (FN) o roca fosfórica es la materia prima para producir fertilizantes solubles (como los superfosfatos), y por lo tanto su precio es generalmente menor que el de estos últimos. Como contraparte, el P de la fosforita natural no está disponible en forma inmediata, haciendo que en muchos estudios de respuesta vegetal se observe una menor eficiencia para este tipo de fuente en comparación con fuentes solubles (Bolan *et al.*, 1990; Zapata y Roy, 2007). Este aspecto, conocido como la eficiencia relativa de la fosforita, ha sido objeto de extensos estudios, puesto que depende no sólo de las propiedades intrínsecas de la propia roca fosfórica, sino también de las propiedades del suelo, de las especies en cuestión, etc. (Khasawneh y Doll, 1978). Existe una alta variabilidad entre las fosforitas desde el punto de vista de un uso directo como fertilizante (Rajan *et al.*, 1996). En Uruguay se han realizado varios estudios evaluando fosforita natural, resultando en valores de eficiencia relativa respecto a los

fertilizantes solubles del tipo superfosfatos que oscilan entre 52 y 142% (Morón, 1982; Bermúdez *et al.*, 2000; Risso *et al.*, 2002; Ayala y Bermúdez, 2008).

En sistemas agropecuarios de mayor intensificación productiva; que implican altas tasas de extracción de nutrientes, y con un componente importante de leguminosas en las mezclas forrajeras; el azufre (S) es otro nutriente que podría estar limitando la producción (Morón, 1996a; Zamalvide, 1995). El S es esencial para las plantas y, en el caso particular de las leguminosas, cumple un rol específico vinculado a la fijación biológica de nitrógeno (Scherer y Lange, 1996; Krusell *et al.*, 2005). A nivel nacional existen antecedentes que indican que en cultivos forrajeros comerciales pueden ocurrir niveles subóptimos de S, tanto en pasturas de trébol blanco (Morón, 2008), como de *Lotus corniculatus* (Barbazán *et al.*, 2007). Estos resultados son coincidentes con estudios anteriores de respuesta al S realizados con pasturas de alfalfa (Zamalvide, 1998).

De los párrafos precedentes se desprende que la fertilización fosfatada de pasturas ha sido objeto de estudio de intensos esfuerzos de investigación de distintos grupos. Por otra parte, varios autores nacionales han revisado y resumido la trayectoria de experimentación e investigación sobre el tema (Morón, 2007; Bordoli, 2007). En general, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes presentan limitantes para implementar un adecuado manejo de la fertilización fosfatada en forma generalizada a nivel de país.

Entre los años 2008 y 2012 se llevó a cabo una red de experimentos de fertilización fosfatada de pasturas, ubicados sobre diversos suelos de las principales zonas pecuarias del país, y que fueron instalados y manejados con un protocolo común de evaluaciones. Durante el trabajo experimental, a partir del año 2010 se hicieron jornadas de campo y de presentación de resultados preliminares (INIA, 2010). La presente publicación tiene como objetivo presentar y discutir los resultados de dicha red.

Objetivos experimentales

El presente trabajo experimental sobre fertilización de pasturas se realizó con el objetivo general de generar una nueva guía de fertilización de pasturas a nivel nacional. De acuerdo con los párrafos precedentes, esto refiere a comprender distintos tipos de suelos, las interacciones con los dos tipos de fuentes de P (solubles o fosforita), y el uso de distintos métodos para P disponible. Los objetivos específicos se abordan en distintos capítulos de la presente publicación, según el siguiente esquema:

- Ajustar niveles críticos de P extractable para dos especies contrastantes (capítulo 2).
- Determinar el equivalente fertilizante para distintos suelos y según fuentes de fertilizantes (capítulo 3).

- Determinar la eficiencia relativa de la fosforita respecto a una fuente de P soluble (capítulo 4).
- Determinar la influencia del exceso de agua sobre el P extractable (capítulo 5)
- Estudiar la respuesta al agregado de S en diferentes suelos (capítulo 6).

Suelos estudiados

Los experimentos fueron realizados en 14 sitios ubicados sobre diversos suelos de las principales zonas pecuarias del país (Figura 1.1 y Cuadro 1.1). Las principales características edáficas de los sitios de la red están resumidos en los Cuadros 1.2 y 1.3, para las profundidades 0–7,5 y 0–15 cm respectivamente. Los experimentos fueron instalados en 2008 y 2009, y finalizaron en 2012.



Figura 1.1. Mapa de ubicación de los sitios experimentales de la Red de Fertilización de Pasturas.

Cuadro 1.1. Identificación y características edáficas de los sitios experimentales de la Red de Fertilización de Pasturas.

Nombre sitio	Zona agroecológica	Tipo de Suelos	Unidad de suelos*	Material generador	Grupo CONEAT*	Coordenadas GPS
La Carolina	Sedimentos /Cristalino	Brunosol Éútrico Vértico	La Carolina	Sedimentos cuaternarios sobre Cristalino	10.12	Lat -33.87998 Long -57.10597
Trinidad	Sedimentos gravillosos /Cristalino	Brunosol Subéútrico	Isla Mala	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino	10.3; 5.4	Lat -33.52172 Long -56.87801
Florida	Cristalino	Brunosol Dútrico Háptico	San Gabriel-Guaycurú	Cristalino	5.02b	Lat -33.99887 Long -56.14657
Pan de Azúcar	Sierras rocosas del Este	Inceptisol	Sierra de Aiguá, Sierra de Ánimas	Cristalino	2.11a	Lat -34.79154 Long -55.15398
Palo a Pique	Lomadas del Este	Brunosol Subéútrico Lúvico	Alférez	Sedimentos poco espesos y gravillosos sobre Cristalino	10.7	Lat -33.25417 Long -54.49833
Isla Patrulla	Sierras no rocosas del Este	Luvisol	Cerro Chato, Bañado del Oro	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino alterado	2.13; 2.20	Lat -33.09735 Long -54.54290
Tres Puentes	Noreste	Brunosol Subéútrico	Tres Puentes	Sedimentos Pelíticos Grises	6.13	Lat -31.44953 Long -55.23330
Rincón	Bajos del Este	Planosol Subéútrico	Río Branco	Sedimentos limo arcillosos	3.52	Lat -32.79931 Long -53.65478
Sauce Cañote	Bajos del Noreste	Planosol Dútrico	Río Tacuarembó	Sedimentos	G03.21	Lat -31.791826 Long -55.65260
Tambores	Basalto profundo	Brunosol Éútrico Vértico	Itapebí - Tres Árboles	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto	12.11; 12.21	Lat -31.891505 Long -56.20270
Glencoe	Basalto profundo	Vertisol Háptico	Itapebí - Tres Árboles	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto	12.11; 12.21	Lat -32.014596 Long -57.15160
Ombúes	Litoral Oeste /Libertad	Vertisol Típico	Risso, Libertad	Sedimentos cuaternarios	10.1; 10.8b; parte de 10.5	Lat -33.90608 Long -57.83110
Young	Litoral Oeste /Fray Bentos	Brunosol Éútrico Vértico	Young, Bequeló	Sedimentos cuaternarios sobre Fray Bentos	11.5; 11.6; parte de 11.4	Lat -32.68285 Long -57.64666
Palmitas	Litoral Oeste /Cretáceo	Brunosol Subéútrico	Cuchilla del Corralito	Sedimentos arenosos sobre Cretáceo	9.5	Lat -33.60221 Long -57.77142

* Unidad de Suelos según la Carta de Reconocimiento de Suelos 1:1 millón (MAP/DSF, 1976).
Grupo CONEAT según MGAP (1979).

Cuadro 1.2. Propiedades físico-químicas de los suelos en muestras tomadas a 0-7,5 cm de profundidad en cada sitio de la Red de Fertilización de Pasturas.

Sitio	pH	Carbono Orgánico	Nitrógeno total	Arena	Limo	Arcilla	P-Bray I	P-Resinas	P-Cítrico
		----- % -----				----- mg P/ kg -----			
La Carolina	5,8	2,8	0,3	39	36	25	1,7	1,7	3,0
Trinidad	6,2	2,0	0,2	51	27	22	3,2	1,4	3,0
Florida	5,8	1,4	0,2	59	25	16	1,5	1,1	2,0
Pan de Azúcar	5,6	2,0	0,2	44	38	18	1,0	1,5	2,0
Palo a Pique	5,4	1,9	0,2	42	40	19	2,1	1,9	4,0
Isla Patrulla	5,4	2,3	0,2	26	42	33	1,2	1,3	1,0
Tres Puentes	5,5	1,9	0,2	34	40	25	1,9	0,8	3,0
Rincón	5,6	1,8	0,2	39	40	21	6,7	6,5	7,0
Sauce Cañote	5,8	1,1	0,1	52	29	21	3,5	3,7	5,0
Tambores	5,7	3,6	0,3	33	37	30	4,9	5,4	6,0
Glencoe	6,1	4,5	0,4	29	36	35	2,1	1,6	4,0
Ombúes	6,7	2,4	0,2	29	37	34	9,7	20,8	16,0
Young	6,0	2,6	0,3	50	25	25	4,0	3,7	5,0
Palmitas	5,8	1,8	0,2	51	22	28	10,1	10,6	10,0

Sitio	Bases intercambiables				Ac.Tit.	CIC pH7	Bases totales	Al int.	% Sat. bases
	Ca	Mg	K	Na					
	----- meq / 100 g -----							%	
La Carolina	16,8	4,0	0,6	0,3	4,9	26,4	21,5		79,7
Trinidad	8,6	3,8	0,3	0,3	4,4	17,3	12,9		73,5
Florida	3,2	2,3	0,5	0,2	3,3	9,5	6,1		64,0
Pan de Azúcar	5,3	3,8	0,7	0,3	4,0	14,1	10,1		67,7
Palo a Pique	5,0	2,6	0,2	0,3	4,3	12,5	8,1		63,6
Isla Patrulla	4,3	3,0	0,7	0,2	5,7	13,9	8,2	0,1	59,8
Tres Puentes	7,0	2,4	0,5	0,4	4,2	14,4	10,3		68,8
Rincón	6,1	2,6	0,3	0,2	3,8	12,9	9,2		70,8
Sauce Cañote	5,6	1,7	0,2	0,3	4,5	12,2	7,8		61,3
Tambores	14,4	8,7	0,4	0,4	6,8	30,7	23,9		76,1
Glencoe	24,6	9,5	0,5	0,4	3,1	38,3	35,2		91,2
Ombúes	24,3	5,4	0,5	0,4	2,0	33,0	31,0		91,8
Young	18,9	3,2	0,5	0,3	4,5	27,4	22,9		83,8
Palmitas	13,9	3,3	0,4	0,1	3,5	21,3	17,8		83,2

Cuadro 1.3. Propiedades físico-químicas de los suelos en muestras tomadas a 0–15 cm de profundidad en cada sitio de la Red de Fertilización de Pasturas

Sitio	pH	Carbono Orgánico	Nitrógeno total	Arena	Limo	Arcilla	P-Bray I	P-Resinas	P-Cítrico
		----- % -----				----- mg P/ kg -----			
La Carolina	5,8	2,8	0,3	39	36	25	1,7	1,7	3,0
Trinidad	6,2	2,0	0,2	51	27	22	3,2	1,4	3,0
Florida	5,8	1,4	0,2	59	25	16	1,5	1,1	2,0
Pan de Azúcar	5,6	2,0	0,2	44	38	18	1,0	1,5	2,0
Palo a Pique	5,4	1,9	0,2	42	40	19	2,1	1,9	4,0
Isla Patrulla	5,4	2,3	0,2	26	42	33	1,2	1,3	1,0
Tres Puentes	5,5	1,9	0,2	34	40	25	1,9	0,8	3,0
Rincón	5,6	1,8	0,2	39	40	21	6,7	6,5	7,0
Sauce Cañote	5,8	1,1	0,1	52	29	21	3,5	3,7	5,0
Tambores	5,7	3,6	0,3	33	37	30	4,9	5,4	6,0
Glencoe	6,1	4,5	0,4	29	36	35	2,1	1,6	4,0
Ombúes	6,7	2,4	0,2	29	37	34	9,7	20,8	16,0
Young	6,0	2,6	0,3	50	25	25	4,0	3,7	5,0
Palmitas	5,8	1,8	0,2	51	22	28	10,1	10,6	10,0

Sitio	Bases intercambiables				Ac.Tit.	CIC pH7	Bases totales	Al int.	% Sat. bases
	Ca	Mg	K	Na					
	----- meq / 100 g -----								%
La Carolina	16,8	4,0	0,6	0,3	4,9	26,4	21,5		81,5
Trinidad	8,6	3,8	0,3	0,3	4,4	17,3	12,9		74,6
Florida	3,2	2,3	0,5	0,2	3,3	9,5	6,1		64,6
Pan de Azúcar	5,3	3,8	0,7	0,3	4,0	14,1	10,1		71,5
Palo a Pique	5,0	2,6	0,2	0,3	4,3	12,5	8,1		65,1
Isla Patrulla	4,3	3,0	0,7	0,2	5,7	13,9	8,2	0,7	58,5
Tres Puentes	7,0	2,4	0,5	0,4	4,2	14,4	10,3		71,3
Rincón	6,1	2,6	0,3	0,2	3,8	12,9	9,2		70,9
Sauce Cañote	5,6	1,7	0,2	0,3	4,5	12,2	7,8		63,6
Tambores	14,4	8,7	0,4	0,4	6,8	30,7	23,9		77,8
Glencoe	24,6	9,5	0,5	0,4	3,1	38,3	35,2		91,9
Ombúes	24,3	5,4	0,5	0,4	2,0	33,0	31,0		94,0
Young	18,9	3,2	0,5	0,3	4,5	27,4	22,9		83,7
Palmitas	13,9	3,3	0,4	0,1	3,5	21,3	17,8		83,6

Brevemente, las técnicas analíticas empleadas fueron las siguientes:

- pH: en agua con potenciómetro y relación suelo-solución 1:2,5.
- Carbono orgánico y nitrógeno total: combustión seca a 900°C con equipo Leco. Para el carbono orgánico se aplicó una corrección por el factor 0,81 para reportar valores equivalentes al método tradicional de digestión húmeda de Tinsley (1967).
- Textura (% arena, limo, arcilla): método de Bouyucos (1962) sin destrucción de materia orgánica. Según Morón (com. pers.), debido a una dispersión insuficiente, esta metodología subestima la fracción arcilla (y sobreestima la fracción arena) en suelos de basalto.
- Fósforo disponible por métodos Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico: ver detalles más adelante y en Cuadro 1.6.
- Calcio y magnesio intercambiables: extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y absorción atómica.
- Potasio y sodio intercambiables: extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y emisión atómica.
- Acidez titulable: Extracción con acetato de calcio 1N a pH 7 y posterior titulación.
- CIC a pH 7: Ca + Mg + K + Na + acidez titulable.
- Aluminio intercambiable: Solamente para el suelo de Isla Patrulla. Extracción con KCl y posterior titulación.
- % saturación de bases: $(Ca + Mg + K + Na) * 100 / CIC$.

En relación a los niveles iniciales de P extractable, es oportuno comentar que los sitios de Ombúes y de Palmitas no reflejan los niveles naturales esperables. Si bien en todos los sitios se buscó que no hubiera habido historia de fertilización con P, es posible que estos dos sitios sí recibieron algún tipo de agregado de P. En el caso de Ombúes, posiblemente haya habido redistribución de P via deyecciones animales. En el caso de Palmitas es posible que haya habido historia de fertilización asociado a un manejo de rotación agrícola-ganadera del predio.

DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

En cada sitio se instalaron tres experimentos, dos de ellos para estudiar las respuestas a P y uno para la respuesta a S. En todos los casos, las dimensiones de las unidades experimentales (parcelas) fueron de 2x6 m (12 m²).

Los experimentos relacionados con la respuesta y dinámica de P fueron evaluados con dos especies leguminosas: trébol blanco (*Trifolium repens* 'Estanduela Zapicán') y *Lotus corniculatus* 'San Gabriel' (de aquí en adelante lotus), conformando dos experimentos adyacentes (ensayos I y II, respectivamente). El diseño de tratamientos fue igual para ambas especies y está resumido en el Cuadro 1.4. Se utilizaron dos tipos de fertilizantes contrastantes: superfosfato triple (0-46/46-0; ST) y fosforita natural (0-10/29-0; FN) de Argelia. La composición (N-Psoluble/Ptotal-K) indica que ambos fertilizantes difieren en el contenido de P total (46% vs 29% de P₂O₅). Además difieren en el contenido de P soluble (46% vs 10% de P₂O₅), aunque dicha "solubilidad" se determina en forma diferente según el tipo de fertilizante: para fertilizantes solubles se determina la solubilidad en agua, mientras para roca fosfórica se determina en ácido cítrico al 2%. Por último, en el tratamiento N° 18 se utilizó S elemental (85% S) en polvo adquirido en droguería, que se aplicó inmediatamente después de la fosforita. Por lo tanto, el diseño experimental para los ensayos I y II corresponde a un diseño factorial incompleto en un arreglo de cuatro bloques completos al azar.

El experimento destinado a evaluar la respuesta a S fue evaluado solamente con trébol blanco y corresponde al ensayo III. El diseño de tratamientos está resumido en el Cuadro 1.5. Como fuente de S se utilizó sulfato de calcio en polvo (13%S). Esta fuente de S tiene la misma naturaleza que el yeso agrícola, excepto que este último se comercializa generalmente granulado. Además, se fertilizó con P aplicando superfosfato triple a una dosis uniforme de 120 kg P₂O₅/ha el

primer año y 30 kg P_2O_5 /ha en años subsiguientes. El diseño experimental para el ensayo III corresponde a un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

Instalación de los experimentos y esquema de fertilización

El manejo de preparación para la instalación de los experimentos fue realizado con aplicaciones de glifosato, con dosis y repeticiones necesarias para lograr el control total de la vegetación existente. La siembra fue realizada al voleo en cobertura, a una dosis de 5 kg/ha de semilla de trébol blanco y 15 kg/ha de lotus, según el experimento. Ambas leguminosas fueron inoculadas con cepas comerciales y peleteadas con carbonato de calcio previo a la siembra. Para asegurar stand de plantas de las leguminosas durante 4 años, y en los casos donde se consideró necesario, se realizaron resiembras anuales en los meses de otoño. También es pertinente mencionar que las condiciones de sequía del año 2008 provocaron importantes fallas de implantación en el primer año de instalación en la mayoría de los ensayos. Al año siguiente fueron resebrados, en muchos casos con máquina de siembra directa. Como consecuencia, en la mayoría de los casos no existió el rendimiento de las pasturas con las dosis de fertilizantes iniciales del primer año.

La aplicación de fertilizantes, tanto la dosis inicial como las refertilizaciones anuales,

también fueron realizadas al voleo y en cobertura en los tres experimentos. La siembra y la fertilización se realizaron en el mismo momento posterior al muestreo de suelos (en los meses de marzo-abril).

Muestreo de suelos

Todos los años, previo a las aplicaciones de refertilización, se realizaron los muestreos parcelarios de suelo. Los mismos se realizaron evitando condiciones extremas de humedad del suelo, es decir que no estuviese ni demasiado seco ni demasiado húmedo, sino cercano a capacidad de campo. Se empleó siempre un calador de tubo con control de profundidad para obtener muestras de dos profundidades: 0-7,5 y 7,5-15 cm. Se reportan resultados para la profundidad 0-15cm, que se determinó como el promedio de las dos profundidades de muestreo. Además, al momento de instalación de cada ensayo (previo a la siembra y fertilización), se obtuvieron muestras de suelo compuestas de cada bloque para la caracterización inicial. Las muestras fueron analizadas para determinar pH en agua, carbono orgánico, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico, textura y P extractable. Este último fue determinado con tres métodos de extracción que se detallan más adelante. En el ensayo de respuesta a S (experimento III) se analizó también contenido de sulfatos. Los resultados de dichos análisis iniciales están resumidos en los Cuadros 1.2 y 1.3.

Cuadro 1.4. Diseño de tratamientos de los experimentos de fósforo: fuentes, dosis inicial y de refertilización anual (kg de P_2O_5 /ha) para los ensayos de trébol blanco y lotus (ensayos I y II, respectivamente).

Fuente de P	Número de Tratamiento	Dosis inicial kg P_2O_5 /ha	Dosis refertilización kg P_2O_5 /ha
Testigo	1	0	0
ST*	2	40	0
ST	3	120	0
ST	4	240	0
ST	5	40	10
ST	6	80	20
ST	7	120	30
ST	8	240	60
ST	9	360	90
FN*	10	40	0
FN	11	120	0
FN	12	240	0
FN	13	40	10
FN	14	80	20
FN	15	120	30
FN	16	240	60
FN	17	360	90
FN + S**	18	80 + 20 S**	20 + 5 S

* ST es superfosfato triple; FN es fosforita natural.

** El S aplicado en el tratamiento 18 es S elemental (S⁰), dosis en kg de S /ha.

Cuadro 1.5. Diseño de tratamientos del experimento de respuesta a azufre (S): dosis anuales de S como sulfato de calcio en trébol blanco (ensayo III).

Fuente	Número tratamiento	Dosis de S kg S /ha /año
Testigo	1	0
Sulfato de calcio	2	10
Sulfato de calcio	3	25

Métodos de fósforo extractable y de sulfatos en suelo

El P extractable fue determinado analíticamente por tres métodos: Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico. En el cuadro 1.6 se resumen los principales aspectos metodológicos de cada una de estas técnicas. En todos los ca-

sos, para la determinación de la concentración de P en el extracto filtrado se utiliza la técnica colorimétrica de Murphy y Riley (1962). La "medición" del color se realiza con un espectrofotómetro registrando la absorbancia en la banda de 882 nm, la cual se relaciona con la concentración de fosfato a través de una curva hecha con soluciones conocidas.

Cuadro 1.6. Principales aspectos metodológicos de las tres técnicas analíticas para determinar fósforo extractable en el presente estudio.

	Bray I (*)	Resinas catiónicas	Ácido cítrico
Solución extractante	fluoruro de amonio (NH ₄ F) 0,03N, ácido clorhídrico (HCl) 0,025N	Resinas catiónicas saturadas en H ⁺ ; 4,7g /100mL	ácido cítrico 0,5%
Relación suelo: solución extractante	3,56 g de suelo : 25 mL de solución	5 g de suelo : 50 mL de mezcla	5 g de suelo : 50 mL de solución
Tiempo de agitado	5 minutos	3 horas	30 minutos
Cita original (#)	Bray y Kurtz (1945)	Zamuz y Castro (1974)	Palermo <i>et al.</i> (1985)

Notas: * La metodología para el análisis Bray I fue modificada con posterioridad al presente estudio. Desde febrero de 2016 el laboratorio de INIA La Estanzuela utiliza una relación suelo: extractante de 2g : 20mL y los frascos se disponen horizontalmente durante agitado (en lugar de verticalmente).

En todos los casos las técnicas tuvieron ligeras modificaciones respecto a la cita original.

En los experimentos de respuesta a S (experimento III) se hizo un muestreo anual de suelos (0-7,5 y 7,5-15cm) para determinar el contenido de S como sulfatos (S-SO₄²⁻). La técnica de análisis que se usa en el Laboratorio de Suelos y Aguas de INIA La Estanzuela es una extracción con fosfato monocalcico según Cantarella y Prochnow (2001). En esta técnica, la relación suelo: solución extractora es de 10: 25, el tiempo de agitado es de 30 minutos y la determinación es por colorimetría (con BaCl₂, en la banda de 420nm). Según Jones (1986) este método de extracción permite estimar en forma satisfactoria la disponibilidad de S para las plantas, en virtud de que extrae los sulfatos de la solución del suelo y también los que se encuentran en forma adsorbida en la fase sólida. Sin embargo, el método no permite estimar el S orgánico fácilmente mineralizable, al cual también se le ha atribuido importancia para recomendaciones de manejo de S en pasturas (Edmeades *et al.*, 1994).

EVALUACIÓN DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE

La producción de forraje fue evaluada con corte a una altura de 5 cm aproximadamen-

te, en un área de muestreo de 3 m². Para ello se emplearon máquinas cortadoras provistas con canasto colector, registrando en el campo el peso verde de forraje cortado. De las parcelas de los tratamientos N° 2, 3, 4, 10, 11 y 12 se conservaron muestras de forraje verde para determinar el contenido de materia seca (105°C, 24-48 horas). Previo al corte se realizó una estimación visual de la composición botánica en cada parcela, distinguiendo dos fracciones: la especie sembrada (trébol blanco o lotus) y otras especies (malezas). Luego del corte de evaluación, todas las parcelas fueron cortadas a la misma altura, retirándose todo el forraje cortado fuera del experimento. Como criterio general, el corte de evaluación se realizó cuando el forraje alcanzó una altura de 10-15 cm ó 15-20 cm, de trébol blanco y lotus respectivamente. De esta manera, se realizaron de 3 a 6 cortes por año en la mayoría de los experimentos, una vez implantada la pastura.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se emplearon distintos análisis estadísticos según los distintos objetivos del trabajo y por ello se explicarán con detalle en cada capítulo.

BIBLIOGRAFÍA

- AYALA, W.; BERMÚDEZ, R.** 2008. Fertilización fosfatada sobre mejoramientos de campo con lotus cv. El Rincón y lotus cv. Maku en suelos superficiales. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 51-61. (Serie Técnica; 172)
- BARBAZÁN, M.; FERRANDO, M.; ZAMALVIDE, J.** 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. Agrociencia, 11(1): 22-34.
- BERMÚDEZ, R.; CARÁMBULA, M.; AYALA, W.** 2000. Estudio comparativo de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre el comportamiento productivo de un mejoramiento extensivo con trébol blanco y lotus. En: Jornada anual de producción animal: resultados experimentales. Unidad Experimental Palo a Pique, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 17-24. (Serie Actividades de Difusión; 225)
- BOLAN, N.S.; WHITE, R.E.; HEDLEY, M.J.** 1990. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. Australian Journal of Experimental Agriculture, 30(2): p. 297-313
- BORDOLI, J.M.** 2003. El fósforo en la agricultura uruguaya: pasturas y trigo. En: SIMPOSIO (2003, Rosario, Argentina). El fósforo en la agricultura argentina. Buenos Aires: INPOFOS Cono Sur. p. 33-38.
- BORDOLI, J.M.** 2007. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. Manejo de la fertilidad en sistemas extensivos (Cultivos y Pasturas). Unidad de Educación Permanente y Postgrado. Montevideo: Facultad de Agronomía. p. 71-79.
- BOUYOUCOS, G.J.** 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal, 54:464-465.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science, 59(1): 39-45.
- CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L.I.** 2001. Determinação de sulfato em solos. En: Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (Eds.). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. p. 225-230.
- CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M. DE; OUDRI, N.** 1981. Guía para fertilización de pasturas. En: Fertilización de pasturas, INIA La Estanzuela. Montevideo: CIAAB. p. 1-15. (Miscelánea; 37).
- EDMEADES, D.C.; SINCLAIR, A.G.; WATKINSON, S.H.; LEDGARD, S.F.; GHANI, A.; THORROLD, B.S.; BOSWELL, C.C.; BRAITHWAITE, A.C.; BROWN, M.W.** 1994. Some recent developments in sulphur research in New Zealand agriculture. Sulphur in Agriculture, 18:3-8.
- INIA.** 2010. Reunión técnica: fertilización en pasturas. Durazno: INIA. 69 p. (Serie Actividades de Difusión; 631)
- JONES, M.B.** 1986. Sulfur availability indexes. En: Tabatabai, M.A. (ed.). Sulfur in Agriculture. Madison: American Society of Agronomy. v. 27, p. 549-566.
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E. C.** 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. Advances in Agronomy, 30: 159-206.
- KRUSELL, L.; KRAUSE, K.; OTT, T.; DESBROSSES, G.; KRAMER, U.; SATO, S.; NAKAMURA, Y.; TABATA, S.; JAMES, E.K.; NIELS, S.; STOUGAARD, J.; KAWAGUCHI, M.; MIYAMOTO, A.; SUGANUMA, N.; UD-VARDI, M.K.,** 2005. The sulfate transporter SST1 is crucial for symbiotic nitrogen fixation in *Lotus japonicus* root nodules. Plant Cell, 17(5): 1625-1636.

MALLARINO, A.P.; CASANOVA, O. 1984. Fertilización fosfatada de leguminosas forrajeras en suelos de texturas medias y finas. *Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay*, 2: 196-203.

MILLOT, J.C.; RISSO, D.; METHOL, R. 1987. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay: Informe técnico para la Comisión Honoraria del Plan Agropecuario. Montevideo: MGAP. 199 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA – DIRECCION DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1/1000.000 y clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay. Tomo 3. 452 p.

MORÓN, A. 1982. I. Fuentes de fósforo para pasturas. En: Fuentes de fósforo para pasturas. Estanzuela, Colonia: CIAAB. p.1-24 (Miscelánea; 42)

MORÓN, A. 1984. Revisión crítica de la guía de fertilización de pasturas. *Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay*, 2: 181-195.

MORÓN, A. 1996a. Azufre: consideraciones sobre su situación en Uruguay. En: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. (Eds), Manejo y fertilidad de suelos, INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. p. 73-79. (Serie Técnica; 76).

MORÓN, A. 1996b. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (I). En: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. (eds.), Manejo y fertilidad de suelos, INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. p. 37-44. (Serie Técnica; 76)

MORÓN, A. 2007. Avances hacia a una nueva guía de fertilización de pasturas. SEMINARIO INTERNACIONAL DE NUTRICIÓN VEGETAL (Paysandú, Uruguay, 2007). Criterios para la Fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú: UDELAR. EEMAC, Facultad de Agronomía.

MORÓN, A. 2008. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 17-29. (Serie Técnica; 172)

MURPHY, J.; RILEY, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.

PALERMO, M.A.; PÉREZ, M.; SERVETTO, M.A. 1985. Índices de disponibilidad de nitrógeno y fósforo en suelos arroceros. Tesis Ing. Agr., Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 98 p.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. 1996. Phosphate rocks for direct application to soils. *Advances in Agronomy*, 57: 77-159.

RISSO, D.F.; MORÓN, A.; ZARZA, A. 2002. Fuentes y niveles de fósforo para mejoramientos de campos en suelos de la región de cristalino. En: RISSO, D.F.; Montossi, F. (eds.). Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino: Fertilización, producción de carne de calidad y persistencia productiva, INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 115-151. (Serie Técnica; 129)

SCHERER, H.; LANGE, A. 1996. N₂ fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. *Biology and Fertility of Soils*, 23: 449-453.

SINCLAIR, A; MORRISON, J; SMITH, L; DODDS, K. 1996. Effects and interactions of phosphorus and sulphur on a mown white clover/ryegrass sward. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 39: 435-445.

TINSLEY, J. 1967. Soil Science. Manual of Experiments. Aberdeen: University of Aberdeen. Department of Soil Science. 124 p.

URUGUAY. MGAP. 1979. Grupos de suelos. Índices de productividad. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca. Comisión de Estudio Agroeconómico de la Tierra. 167 p.

ZAMALVIDE, J. 1995. Deficiencias de azufre en suelos del Uruguay. Revista Plan Agropecuario, 67: .31-35.

ZAMALVIDE, J. 1998. Fertilización de pasturas. En: Berretta, E.J. XIV Reunión del Grupo técnico regional del Cono Sur en mejoramiento y utilización de recursos forrajeros del área tropical y subtropical: Grupo Campos, 14., INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 97-107. (Serie Técnica; 94)

ZAMALVIDE, J.P.; MALLARINO, A.P.; CASANOVA, O.N.; GENTA, H. 1978. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. En: REUNIÓN. 1era Reunión Técnica Facultad de Agronomía, Montevideo.

ZAMUZ, E.M. DE; CASTRO, J.L. 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelos para determinar fósforo asimilable. Montevideo: CIAAB. 15 p. (Boletín Técnico; 15)

ZAPATA, E.; ROY, R.N., 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Roma: FAO. 155 p. (Boletín FAO Fertilizantes y Nutrición vegetal; 13)

2. Estimación de umbrales críticos de P extractable en suelo para trébol blanco y lotus corniculatus

Cuadro, R.¹, Quincke, A.², Giorello, D.¹, Bermúdez, R.³

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La producción de carne y leche de Uruguay requiere pasturas con especies leguminosas forrajeras que permitan aumentar la producción de forraje, tanto en cantidad como en calidad. En virtud de que los suelos del Uruguay son naturalmente deficientes en su capacidad de suministro de fósforo (P), el fertilizante fosfatado es un insumo fundamental en la productividad de las pasturas. Por ello, la fertilización fosfatada de pasturas ha sido objeto de estudio de distintos grupos de investigación, a fin de establecer criterios y recomendaciones para implementar un buen manejo agronómico de este nutriente. Varios trabajos resumen el conocimiento sobre la dinámica del fósforo en Uruguay (por ejemplo Castro *et al.*, 1981; Mallarino y Casanova, 1984; Morón, 1996; Zamalvide, 1992), lo cual da cuenta de la extensa historia de investigación y experimentación sobre este tema en nuestro país.

Fósforo “disponible” y “extractable”

Si bien las plantas se abastecen solamente del P que se encuentra en forma disuelta en el suelo (básicamente como los aniones inorgánicos $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}), la capacidad de aporte de P del suelo está determinada en gran medida por una fracción inorgánica de la fase sólida que se denomina fósforo “lábil” o “disponible”. Esta denominación se debe a que dicha fracción es capaz de reponer el fósforo de la solución de suelo a medida que éste es removido por la absorción radicular de las plantas en crecimiento. Además el P en el suelo se encuentra en una tercera fracción, que se de-

nomina “no lábil” en virtud de que comprende formas de P no aprovechables para las plantas. De todas formas, las tres fracciones se encuentran en un sistema de equilibrios, según el siguiente esquema de disponibilidad de P propuesto por Larsen (1977):



Por ello, el abordaje más común y aceptado para el manejo agronómico y ambiental de la fertilización fosfatada está basado en la estimación del P disponible mediante algún método de extracción química en el laboratorio. Cualquier método de extracción se basa en un protocolo de laboratorio con una “solución extractante” que se hace reaccionar con una muestra de suelo para solubilizar una fracción reactiva de P por medio de uno o más mecanismos químicos. El resultado del análisis es el P extractable ($mg \text{ P kg}^{-1}$) con un método de análisis dado (p.ej Bray I). La cantidad de P extractable puede variar no sólo por la naturaleza de la solución extractora, sino también por el tiempo de agitación y por la relación suelo: solución. Además, la solución extractora puede también reaccionar con otros componentes del suelo (por ejemplo óxidos, arcillas, carbonatos), lo cual determina que un mismo método puede tener distinta capacidad de extracción de P en diferentes tipos de suelos.

Dadas estas consideraciones, el análisis de P extractable debe ser entendido como un *indicador* de la cantidad de P que efectivamente se encuentra disponible para las plantas. Así, el resultado del análisis de suelo, sólo *tendrá utilidad* si se dispone de la *información de interpretación* para el método empleado y el tipo de suelo en cuestión.

¹ Ing. Agr., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

² Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

³ Ing. Agr. MPhil., hasta 2015 Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Treinta y Tres.

El modelo más utilizado para el estudio de la respuesta a la fertilización fosfatada y la determinación de niveles y umbrales críticos para cultivos y pasturas, se basa en la relación entre el rendimiento relativo (respecto de un rendimiento máximo o del tratamiento fertilizado) y el nivel de P extractable en suelo, que puede ser medido por diferentes métodos analíticos. A partir de dichos valores se determinan categorías de fertilidad fosfatada sobre la base de niveles críticos o umbrales (Ron; 2014). La interpretación de estas categorías establece que la probabilidad de respuesta y el beneficio económico son elevados solamente con niveles bajos y muy bajos de P y, en contraste, se reducen hacia los niveles óptimos o superiores de P en el suelo (Correndo, 2018)

La precisión que se puede lograr con la interpretación del resultado de un análisis de suelos, en cuanto a la respuesta vegetal que va a tener una pastura durante un año, tomando las muestras de suelo al inicio de la estación de crecimiento de la misma, es particularmente muy variable, ya que no tenemos la certeza de las características meteorológicas que controlarán el crecimiento de las plantas (Marino y Echeverría, 2018). En otras palabras, el grado de incertidumbre es elevado (Dahnke y Olson, 1990) y en general, los niveles de un nutriente en suelo explican no más de 40 a 60 % del rendimiento o respuesta del cultivo (Correndo y García, 2017, citado por Marino y Echeverría, 2018).

Niveles críticos

En la predicción de las necesidades de fósforo para pasturas de leguminosas ha sido necesario establecer los niveles críticos de fósforo, considerando como nivel crítico aquella concentración de fósforo del suelo determinado por un extractante que permite obtener el 90% del rendimiento máximo. Teniendo siempre presente que los niveles críticos dependen principalmente del tipo de cultivo, propiedades del suelo y condiciones ambientales y los extractantes analíticos utilizados, es necesario disponer de métodos

de diagnóstico de la fertilidad que se ajusten lo mejor posible a nuestros ambientes edáficos. Errores en la determinación de concentraciones críticas resultan en incorrectas decisiones relativas a las aplicaciones de fertilizantes (Mallarino, et. al. 1992).

En ensayos de respuesta a la fertilización fosfatada llevados adelante en diferentes regiones del país, sobre pasturas con un importante aporte del componente leguminosa a la biomasa total producida, se ha demostrado una respuesta significativa en la producción de materia seca de la especie sembrada al aumento de los niveles de fósforo (P) en el suelo (Bordoli, 1982; Risso, et. al 2014).

Las especies pueden tener diferentes capacidades para absorber nutrientes desde el suelo, debido a diferencias en su morfología. Esto hace que para el caso de nutrientes pocos móviles como el fósforo, existan diferencias importantes tanto desde el punto de visita de la eficiencia de utilización del nutriente dentro de la planta para producir materia seca, así como también a nivel de los requerimientos mínimos de P en el suelo para lograr maximizar las producciones de materia seca (Bordoli, 1998).

Si bien los umbrales son la base fundamental para la recomendación de fertilización, es necesario complementar dicha información con modelos que permitan predecir la dosis necesaria en cada suelo particular para alcanzar esos umbrales críticos (Rubio, et. al., 2007). Es así que es de vital importancia poder optimizar el uso y manejo de la nutrición fosfatada de acuerdo a la relación entre las necesidades potenciales de las pasturas y la disponibilidad que dicho nutriente presenta a nivel del suelo.

OBJETIVOS

El objetivo específico del presente trabajo es establecer niveles críticos de P extractable en el suelo que permitirán formular recomendaciones de fertilización según las particularidades de suelo o historia de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en base a la red de experimentos de la presente publicación. La metodología general empleada está resumida en el Capítulo 1 de la misma. Se utilizaron los tratamientos 1, 3 4, 7, 8, 11, 12, 15 y 16 (cuadro 1.4).

La producción anual de materia seca de trébol blanco o de lotus de cada parcela permitió establecer, para cada año, sitio y especie, el rendimiento relativo (RR) de cada tratamiento. El mismo fue calculado como: $RR = \text{rendimiento observado} / \text{rendimiento máximo promedio (de cada fuente por bloque)} * 100$.

Todos los años, previo a la refertilización, se hizo el muestreo de suelos a dos profundidades: 0-7,5 y 7,5-15 cm. Los datos reportados de P extractable en suelo para la profundidad 0-15 cm se corresponde con el promedio entre las dos profundidades muestreadas. El P extractable en el suelo se determinó por tres métodos de extracción: Bray I (Bray y Kurtz, 1945), resinas de intercambio catiónico (Zamuz y Castro, 1974), y ácido cítrico.

Se obtuvieron los P críticos e intervalos de confianza para las combinaciones de especie ($n=2$) * sitio ($n=14$) * fuente ($n=2$) * método de análisis de P ($n=3$) * profundidad de muestreo ($n=2$). Los umbrales críticos reportados corresponden a los obtenidos en promedio para 2 años en 10 sitios y 3 años en 4 sitios.

Para el cálculo de los umbrales óptimos para un RR del 90% se utilizó la curva de calibración del arcoseno- logaritmo (ALCC), reportada por Dyson y Conyers (2013) y modificada por Correndo et. al 2017. El ALCC se ha desarrollado para determinar límites

de confianza y el valor crítico para varios nutrientes. El mismo considera como variables aleatorias el rendimiento relativo de la producción anual de materia seca y el valor de análisis de suelo. El método ALCC modificado se ajustó con paquete Excel (Correndo, et. al, 2017b).

Para comparar los diferentes P críticos obtenidos en los diferentes años para cada combinación, se realizó un análisis de varianza poniendo P crítico como variable dependiente y sitio, fuente, profundidad de muestreo y método de análisis como variables clasificatorias (información no presentada en esta publicación).

Para el caso de trébol blanco no se presenta información de la zona de sierras rocosas del este (Cuchilla de los Ladrones) debido a que no hubo una buena implantación del ensayo por restricciones propias del tipo de suelo para esta leguminosa. En el caso de *Lotus corniculatus*, no se presenta información de las zonas del litoral oeste (sobre Libertad y Cretáceo) debido a que los ensayos tuvieron una importante contaminación de trébol blanco. En la zona de sedimentos gravillosos sobre Cristalino (Flores) no se sembró el ensayo de lotus.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2.1 y 2.2 se presentan las producciones de materia seca obtenidas por sitio, para trébol blanco y lotus por fuente de P aplicada, para el promedio de los años evaluados.

Nota: en este capítulo, los sitios Isla Patrulla, Tres Puentes y Trinidad se denominan Cuchilla Ladrones, Minas de Corrales y Flores, respectivamente.

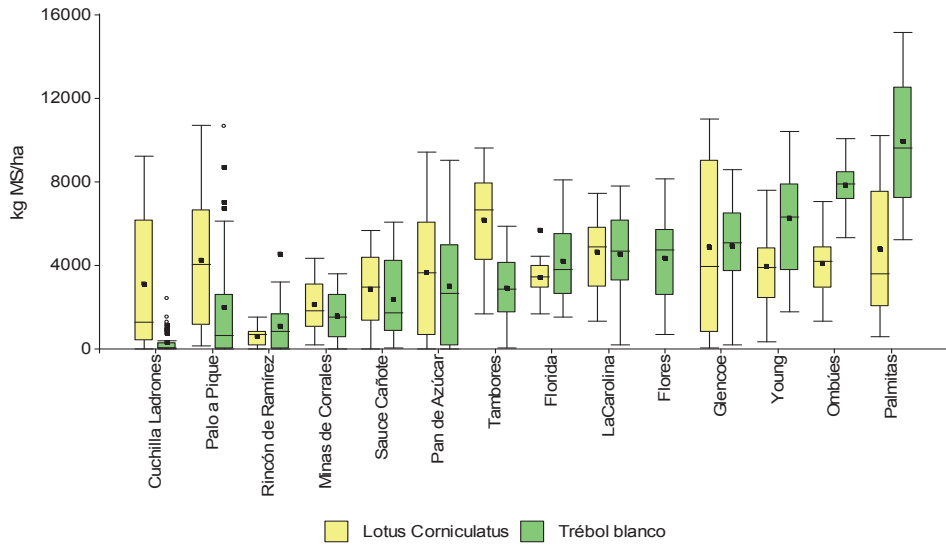


Figura 2.1. Box-plot para la producción de materia seca (kg/ha) de trébol blanco y *Lotus corniculatus*, según sitio, utilizando como fuente de fósforo super triple.

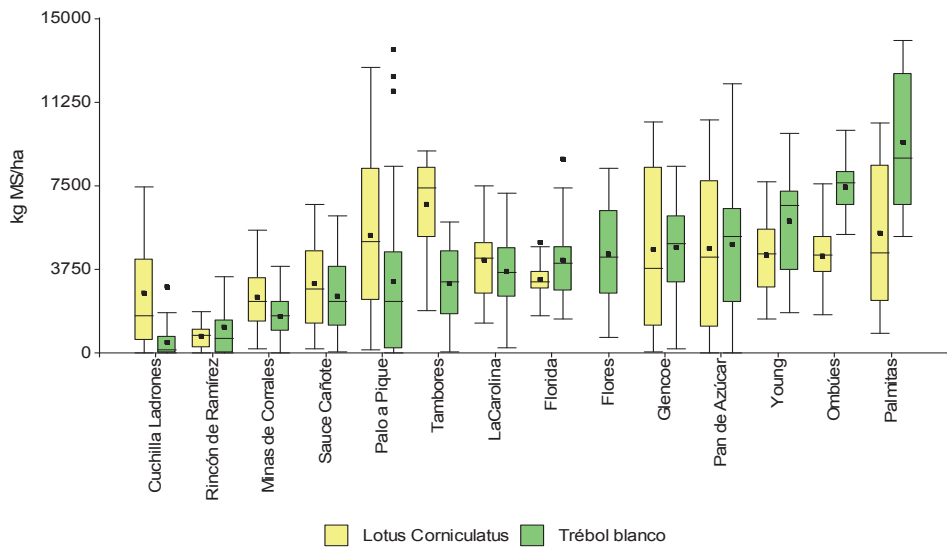


Figura 2.2. Box-plot para la producción de materia seca (kg/ha) de trébol blanco y *Lotus corniculatus*, según sitio, utilizando como fuente de fósforo fosforita natural.

Los rangos de producción de materia seca obtenidos durante los años evaluados fueron entre 0 y 14000 kg MS/ha con una media de 4480 kg MS/ha para trébol blanco y entre 0 y 12800 kg MS/ha con una media de 4226 kg MS/ha para *Lotus corniculatus*. Se destacan sitios como Cuchilla de los Ladrones (Sierras no rocosas del Este) donde la materia seca promedio anual de trébol blanco fue muy baja, de-

bido a una baja adaptación de la especie a esos tipos de suelos, registrándose producciones solamente en las parcelas con mayores dosis de P aplicados. En el otro extremo tenemos Palmitas (Litoral oeste/Cretáceo) y Ombúes (Litoral oeste/Libertad) con los mayores niveles de producción de materia seca para trébol blanco. En estos dos sitios ya se partía de niveles altos de P en suelo.

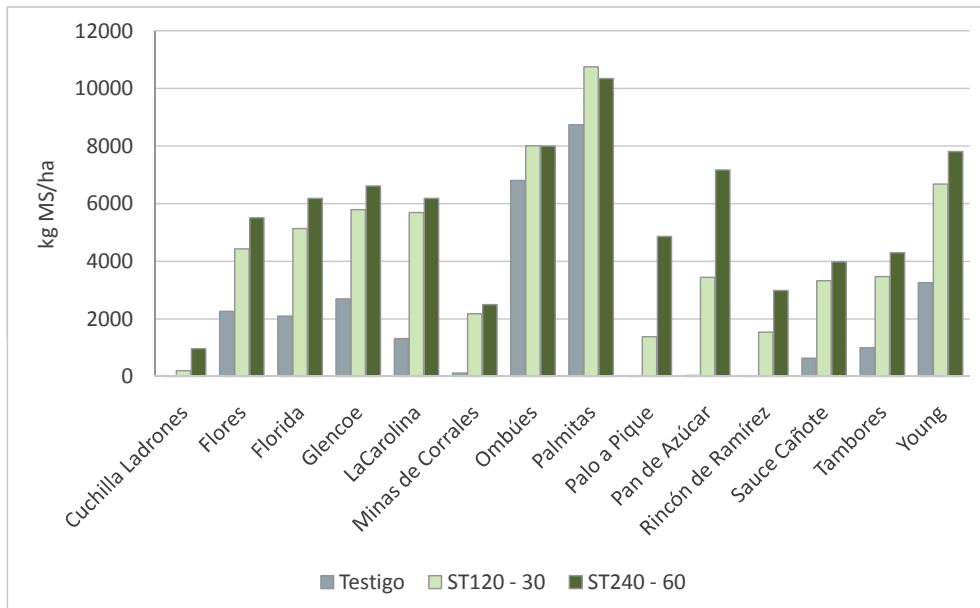


Figura 2.3. Producción de materia seca (kg/ha) de trébol blanco por tratamiento, según diferentes niveles de fertilización inicial y refertilización de fósforo, por sitio, utilizando como fuente de fósforo super triple.

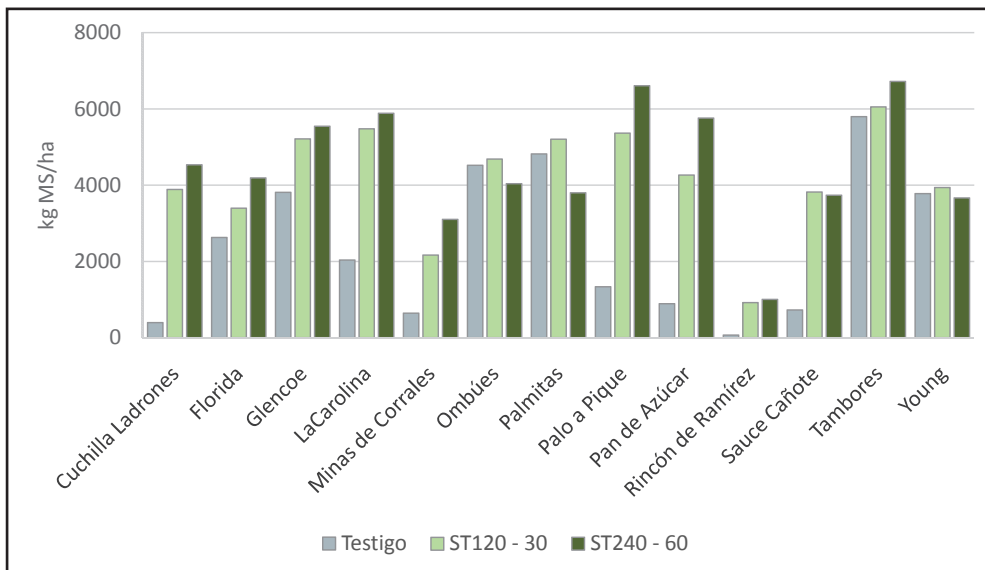


Figura 2.4. Producción de materia seca (kg/ha) de *Lotus corniculatus* por tratamiento, según diferentes niveles de fertilización inicial y refertilización de fósforo, por sitio, utilizando como fuente de fósforo super triple.

La producción de materia seca tanto para trébol blanco como para lotus fue muy variable entre años y sitios evaluados. De igual manera en todos los sitios existió una respuesta positiva en producción de materia seca ante el agregado de fósforo, para ambas fuentes evaluadas (Figuras 2.3 y 2.4).

Las respuestas en producción de materia seca se relacionaron con el P extractable del suelo obtenido en el otoño previo, dependiendo dichas relaciones del tipo de fertilizante utilizado, el método de análisis seleccionado y la profundidad de muestreo. En las figuras 2.5 y 2.6 se muestran dos ejemplos de las

respuestas obtenidas en producción de materia seca ante el aumento de los niveles de P en suelo. Dichas respuestas fueron utilizadas para realizar las calibraciones de los umbrales críticos presentadas más adelante.

Los valores de P críticos fueron diferentes significativamente entre especies, profundidad de muestreo, sitio, fuente de P utilizada y

método de análisis de P extractable en suelo ($P < 0.05$). La profundidad de muestreo más superficial (0-7.5 cm) fue la que presentó la mayor variabilidad entre los valores de P críticos registrados ($p < 0.05$), existiendo una interacción con la fuente de P utilizada y el método de análisis de P utilizado ($p < 0.05$). En los cuadros 2.1 y 2.2 se presentan los rangos óptimos de P en el suelo por espe-

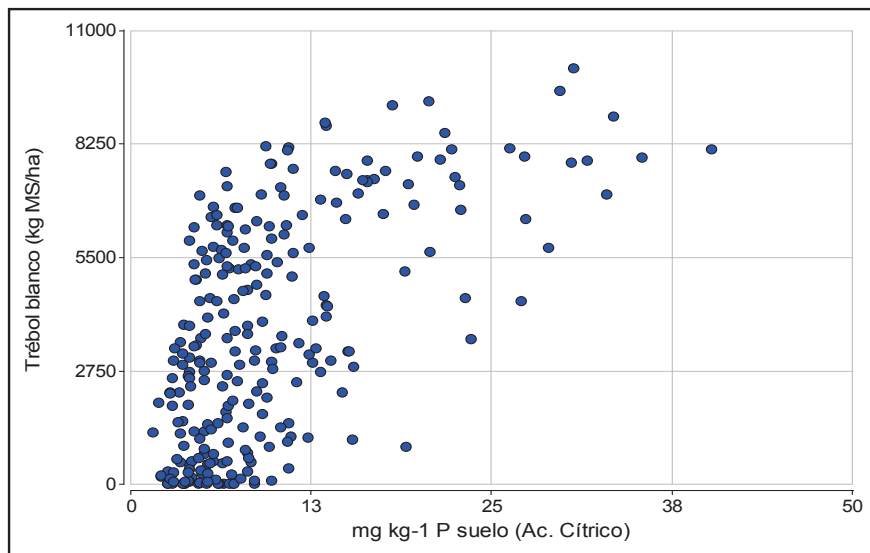


Figura 2.5. Respuesta en producción anual de materia seca de trébol blanco (kg MS/ha) al aumento en P extractable debido a la fertilización con super triple. La profundidad de muestreo es 0-15 cm y el P extractable es medido con el método del ácido cítrico.

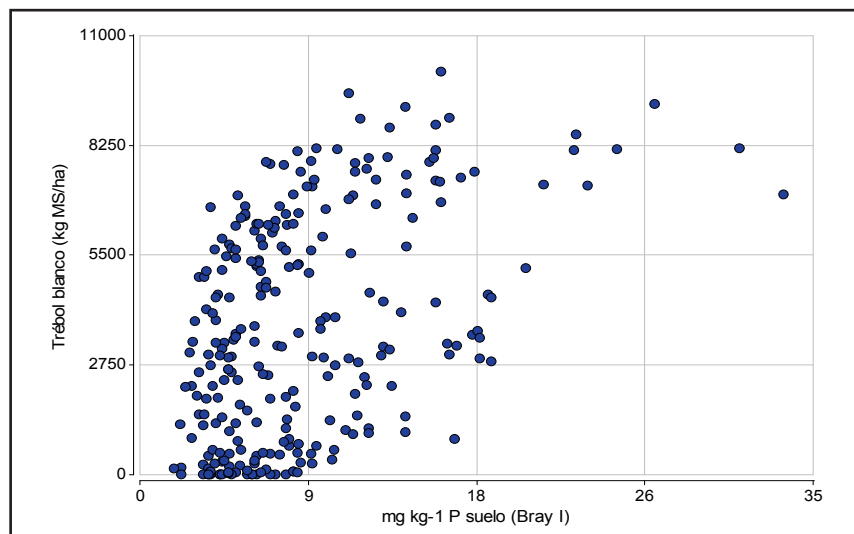


Figura 2.6. Respuesta en producción anual de materia seca de trébol blanco (kg MS/ha) al aumento en P extractable debido a la fertilización con super triple. La profundidad de muestreo es 0-15 cm y el P extractable es medido con el método Bray I.

cie, según zona agroecológica, profundidad de muestreo, fuente de P utilizada, y método de análisis. Para la combinación fosforita natural como fuente de P y método Bray no se presenta información debido a que el modelo no fue significativo.

Cuadro 2.1. Rango óptimo de P extractable (mínimo -máximo, en mg P kg⁻¹) para trébol blanco según zona agroecológica, profundidad de muestreo, fuente de P utilizada y método de análisis.

Zona agroecológica	Super triple			Fosforita natural	
	Método	0-7,5 cm	0-15 cm	0-7,5 cm	0-15 cm
Sedimentos gravillosos/ Cristalino	Bray	11-20	8-17		
	Cítrico	17-25	10-18	21-45	14-31
	Resinas	14-24	9-18	22-51	15-36
Cristalino	Bray	9-19	7-11		
	Cítrico	10-19	8-11	20-29	10-13
	Resinas			9-17	
Sedimentos/Cristalino	Bray	9-19	8-14		
	Cítrico	15-27	11-20	21-36	14-22
	Resinas	14-30	11-21	35-83	24-48
Sierras rocosas/ Cristalino	Bray	6-11	9-14		
	Cítrico	8-13	8-14	18-27	12-18
	Resinas			10-21	7-13
Basalto/Brunosol	Bray	9-13	7-11		
	Cítrico	12-17	8-12	20-35	14-22
	Resinas	7-12	6-9	21-36	12-24
Basalto/Vertisol	Bray	19-25	15-18		
	Cítrico	17-25	13-17	22-35	15-23
	Resinas	25-34	18-23	33-55	22-34
Noreste/Brunosol	Bray	13-24	9-15		
	Cítrico	12-20	9-12	19-30	12-17
	Resinas	7-14	6-10	14-29	10-16
Noreste/Bajos	Bray	20-32	11-16		
	Cítrico	17-32	16-21	27-48	20-31
	Resinas	22-32	19-24	46-76	30-44
Litoral oeste/Libertad	Bray	13-20	10-15		
	Cítrico	23-32	20-27	31-52	24-40
	Resinas	37-55	30-43	37-55	37-48
Litoral oeste/Cretáceo	Bray	16-24	12-17		
	Cítrico	14-20	12-16	19-31	14-21
	Resinas	23-34	18-25	29-54	22-36
Litoral oeste/ Fray Bentos	Bray	9-13	9-11		
	Cítrico	11-16	8-11	18-34	14-21
	Resinas	8-15	9-12	14-38	14-28
Lomas del este	Bray	13-23	10-14		
	Cítrico	14-22	9-14	25-54	15-22
	Resinas	11-29	8-15	22-87	13-29
Bajos del este	Bray	11-22	11-16		
	Cítrico	11-20	10-15	17-27	13-18
	Resinas	10-16	10-14	18-33	14-22

Cuadro 2.2. Rango óptimo de P extractable (mínimo -máximo, en mg P kg⁻¹) para *Lotus corniculatus* según zona agroecológica, profundidad de muestreo, fuente de P utilizada y método de análisis.

Zona agroecológica	Método	Super triple		Fosforita natural	
		0-7,5 cm	0-15 cm	0-7,5 cm	0-15 cm
Cristalino	Bray	8-12	7-10		
	Cítrico	14-21	8-12	18-43	10-20
	Resinas				
Sedimentos/ Cristalino	Bray	10-16	9-15		
	Cítrico	16-25	12-17	18-33	14-25
	Resinas	19-29	15-23	31-61	23-44
Sierras rocosas/ Cristalino	Bray	4-8	3-5		
	Cítrico	8-11	6-8	19-31	12-18
	Resinas			14-32	9-17
Basalto/Brunosol	Bray	6-13	5-8		
	Cítrico	13-25	8-14	24-48	13-20
	Resinas	8-16	5-10	32-95	18-48
Basalto/Vertisol	Bray	15-21	13-17		
	Cítrico	16-26	12-16	22-30	15-20
	Resinas	20-32	16-20	30-49	20-29
Noreste/Brunosol	Bray	8-13	6-9		
	Cítrico	10-16	7-10	18-41	11-22
	Resinas			13-35	9-18
Noreste/Bajos	Bray	19-38	17-24		
	Cítrico	18-34	15-22	32-48	18-36
	Resinas	18-36	17-24	41-77	23-44
Lomadas del este	Bray	10-15	8-10		
	Cítrico	11-16	8-10	20-46	13-26
	Resinas	5-11	5-8	12-43	9-22
Bajos del este	Bray	8-13			
	Cítrico	8-16	9-14	14-35	13-23
	Resinas	8-14	11-15	16-42	15-29
Sierras no rocosas del Este	Bray	8-15	6-10		
	Cítrico	5-12	5-8	24-60	14-22
	Resinas			24-95	

La información obtenida en este trabajo debe comprender las particularidades relevantes, y a la misma vez debe ser presentada de forma simple. Los resultados de los cuadros 2.1 y 2.2 indican a igual que lo presentado por Bordoli (1998) que no es posible establecer un único rango de nivel crítico para todos los suelos estudiados. Además. En coincidencia con Ron (2014), los valores obtenidos muestran que los distintos métodos de análisis extraen distintas cantidades de P de la fracción lábil, por lo cual las calibraciones son diferentes.

Los umbrales críticos obtenidos para FN presentaron mayores rangos de variación con respecto a los obtenidos cuando la fuente de fósforo utilizada fue super triple. Con FN el método de resinas fue el que presentó mayor coeficiente de variación, con valores extremos más altos, con respecto a los obtenidos con el método del ácido cítrico.

Para el caso del sitio ubicado sobre suelos del litoral oeste/Libertad (Ombúes), los valores iniciales de P extractable fueron altos (promedio de 20 mg P kg⁻¹ para ác. cítrico). En consecuencia hubo una baja respuesta en trébol blanco, lo que se vio reflejado en altos rangos críticos observados. Para lotus ya se mencionó que hubo excesiva competencia de trébol blanco.

Por su parte, la zona de sierras rocosas del este (Cuchilla de los Ladrones) para lotus, tuvo buena respuesta a la fertilización fosfatada cuando se utilizó super triple, pero no se

logró captar dicho aumento de fertilidad en el suelo a través de los métodos Bray y Cítrico. Esto provoca que los rangos críticos encontrados sean bajos. Similares resultados fueron encontrados en la zona de Sierras rocosas sobre Cristalino (Pan de Azúcar) tanto para trébol blanco como para lotus.

CONCLUSIONES

Las diferencias encontradas en los valores de P críticos para ambas especies en los diferentes suelos, indican que no es posible establecer un único nivel crítico (o rango) para todos los suelos.

Es necesario a la hora de tomar decisiones de fertilización fosfatada tener en cuenta la profundidad de muestreo, el método analítico de P utilizado, así como también la fuente de fósforo utilizada para la refertilización.

Conocido el umbral crítico de P, el siguiente paso es evaluar el nivel de P extractable del suelo. Para ello se debe seguir el protocolo de extracción de muestras de la forma más estricta posible. El muestreo debe ser lo más riguroso y preciso posible, ya que de él depende el diagnóstico preciso de la fertilidad fosforada del suelo en cuestión.

Con la información obtenida de umbrales óptimos de fósforo para ambas leguminosas, se espera poder establecer grupos de suelos que permitan aplicar los resultados a dominios de inferencia más amplios.

BIBLIOGRAFÍA

BORDOLI, J.M., J. CASELLA, O. CASANOVA, A.P. MALLARINO, Y A. RABUFFETTI. 1982. Fertilización fosfatada de pasturas de Trébol rojo y raigrás en suelos de la cuenca lechera. 5ta. Reunión Técnica. Facultad de Agronomía, Montevideo.

BORDOLI, J.; MALLARINO, A. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till Corn. En: *Agronomy journal*. 90:27-33.

BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59:39-45.

CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M. DE; BARBOZA, S. 1981 Fertilización de pasturas en el Litoral Oeste del Uruguay. *Investigaciones Agronómicas (CIAAB)*, 2 (1): 56-67.

CORRENDO, A. A., SALVAGIOTTI, F., GARCÍA, F. O. Y GUTIÉRREZ-BOEM, F. H. 2017b. Modified ALCC Excel Tool. (v3. xlsx). [Software de cómputo]. Buenos Aires, Argentina. International Plant Nutrition Institute. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool.

CORRENDO, A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis de Msc Universidad de Buenos Aires. Area Ciencias del Suelo. 165 pp.

DAHNIKE, W. C. Y OLSON, R. A. 1990. Soil test correlation, calibration and recommendation. En Westerman, R. L. (Ed.). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America Book Series N°3. Madison, Wisconsin, EE.UU.: SSSA. P. 45-71.

DYSON, C.; CONYERS, M. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test – crop response datasets. *Crop & pasture Science*, 64, 435-441.

LARSEN, S. 1977. Evaluation of native and residual phosphorus in soil as a source of phosphorus for plants. En: Blair, G.J., (ed.). *Prospects for improving efficiency of phosphorus utilization; proceedings*. Armidale: Armidale University of New England. p. 31-33.

MALLARINO, A.P.; CASANOVA, O. 1984. Fertilización fosfatada de leguminosas forrajeras en suelos de texturas medias y finas. *Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay*, 2 (3): 196-203.

MALLARINO, A. O.; BLACKMER, A. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for Corn. *Agronomy Journal* 84:850-856.

MARINO, M, A; ECHEVERRÍA, H. 2018. Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa L*) en argiudoles. En: *Agriscientia*. Vol, 35:1124.

RISSO, D.; CUADRO, R.; MORON, A. Respuesta de un mejoramiento de campo a estrategias de fertilización fosfatada sobre un suelo de basalto. Alternativas tecnológicas para los sistemas ganaderos del basalto. Montevideo, Serie técnica 217. UY: INIA, p. 35-53.

RON, M. 2014. Algunos Saberes implícitos en la calibración de análisis de suelos. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II reunión nacional "Materia Orgánica y sustancias húmicas". Bahía Blanca.

RUBIO G., M.J. CABELLO, Y F. GUTIERREZ BOEM. 2007. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas* 35: 6-10. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

ZAMALVIDE, JP. 1992. Dinámica de fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. *Rev. INIA Inv. Agr.* 1: 85 - 93.

ZAMUZ, E.M. DE; CASTRO, J.L. 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelos para determinar fósforo asimilable. Montevideo: CIAAB. 15 p. (Boletín Técnico; 15).

3. Relación entre fósforo agregado y fósforo extractable en pasturas de Trébol Blanco y *Lotus Corniculatus* instaladas sobre distintos suelos

Quincke, A.¹; Cuadro, R.²; Giorello, D.²; Bermúdez, R.³

INTRODUCCIÓN

Conocer la relación entre dosis de P agregado como fertilizante y el aumento en el P extractable del suelo al momento de su aplicación, significa conocer la eficiencia inicial del fertilizante a agregar para cada suelo en particular. Castro *et al.* (1981b) y Bordoli (1998) denominan a esta relación “equivalente fertilizante” (EF).

En Uruguay Castro *et al.* (1981a) citan valores de EF, utilizando el método de P-Bray, que variaron entre 5.1-12.8 kg P₂O₅/ha para superfosfato y 7.5-37.0 kg P₂O₅/ha para hiperfosfato, dependiendo del tipo de suelo. Por su parte Castro *et al.* (1981b), utilizando el método de P-resinas, mencionan que se necesitan entre 5 y 10 kg P₂O₅/ha para superfosfato y entre 7 y 12 kg P₂O₅/ha para aumentar 1 mg P/kg en el suelo, dependiendo del grupo de suelo a refertilizar. Investigaciones realizadas por las Universidades de Entre Ríos y de la República del Uruguay determinaron que se requieren aplicaciones al voleo de 10 a 30 kg de P₂O₅ por hectárea (aplicado como superfosfato triple) para aumentar el P-Bray en 1 mg P/kg al año de la aplicación (Quintero *et al.*, 1997).

Uruguay tiene una alta variabilidad de suelos y la información existente sobre el tema está muy sesgada hacia suelos del litoral oeste. El nivel de información disponible en las otras regiones del país es bajo, por lo que es necesario la realización de estudios en dichas regiones.

El presente capítulo se refiere específicamente al objetivo de estimar el equivalente ferti-

zante para diferentes suelos de uso pastoril en Uruguay utilizando superfosfato triple y fosforita natural como fertilizantes fosfatados. Esto implica, en otras palabras, determinar la dosis de fósforo (kg P₂O₅ / ha) que sería necesario aplicar para aumentar el P extractable en 1 mg P/kg al momento que se fertiliza. La profundidad de muestreo a la cual refieren los resultados es 0-7.5 y 0-15cm, al igual que los resultados presentados en los demás capítulos de esta publicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con la información generada en la red de experimentos de fertilización fosfatada de pasturas de INIA (Capítulo 1), sobre pasturas de *Trifolium repens* ‘Estanzuela Zapicán’ (TB) y *Lotus corniculatus* ‘San Gabriel’ (LC). Se usaron los datos de los 14 sitios ubicados sobre diferentes suelos de las principales zonas pecuarias del país. La descripción detallada de las propiedades físico-químicas de los suelos se presentan en el Cuadro 1.2 del Capítulo 1.

Se utilizaron los tratamientos 1, 3, 4, 11 y 12 (Cuadro 3.1) para evaluar los dos tipos de fuentes de P: superfosfato triple (ST 0-46/47-0) y fosforita natural de Argelia (FN 0-10/29-0), aplicados en 2 dosis iniciales y sin refertilización. La fertilización fue hecha en otoño al voleo, junto con la siembra de las pasturas. El muestreo de suelos se realizó durante los cuatro años posteriores, a dos profundidades: 0-7.5 y 7.5-15cm. El valor de análisis de suelo para la profundidad 0-15cm fue calculado como el promedio de las dos profundidades determinadas.

¹ Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

² Ing. Agr., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

³ Ing. Agr. MPhil., hasta 2015 Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Treinta y Tres.

Cuadro 3.1. Descripción de tratamientos de fertilización fosfatada (kg P₂O₅/ha) usados para el cálculo de Equivalente Fertilizante.

Tratamiento	Fertilización inicial * (kgP ₂ O ₅ /ha)	Tipo de fertilizante
1	0	-
3	120	Supertriple
4	240	Supertriple
11	120	Fosforita natural
12	240	Fosforita natural

* Estos tratamientos no recibieron refertilizaciones posteriores.

El equivalente fertilizante refiere a la dosis de P necesaria para elevar el P extractable en 1 mg P/kg luego de la fertilización. Para el cálculo del EF se realizaron los siguientes pasos:

1. Para los años subsiguientes al año de fertilización, se calculó el incremento debido a la fertilización como la diferencia respecto al tratamiento testigo correspondiente (mismo año, sitio y bloque);
2. Aplicar transformación logarítmica a esta variable;
3. Realizar regresión lineal de esta variable transformada en función de los años de muestreo;
4. Registrar el intercepto y retransformar a escala natural (mg P/kg). Es la estimación del incremento debido a la fertilización al momento de la fertilización;
5. Calcular el EF dividiendo la dosis aplicada (120 ó 240 kg P₂O₅ ha⁻¹) entre el intercepto retransformado (mg P/kg).

Se realizaron un total de 648 regresiones (para las combinaciones de sitio, especie, fuente de P, dosis de P, método de P extractable y profundidad de muestreo), y resultó que el EF fue estadísticamente significativo en 477 regresiones (p-valor para el intercepto menor a 0.05). Los valores resultantes de EF fueron sometidos a un análisis de varianza para evaluar efectos de sitio, especie, fuente de P, dosis de P, método de P extractable y profundidad de muestreo. Los resultados que se reportan son las medias de EF estimadas con el modelo lineal del análisis de varianza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sitio, la fuente, el método de P extractable y la profundidad de muestreo afectaron el EF en este estudio. Por el contrario, ni la especie forrajera (TB o LC), ni la dosis inicial (120 ó 240 kg P₂O₅ ha⁻¹) tuvieron efectos sobre el valor de EF. Se presentan los resultados de los equivalentes fertilizantes para los 14 sitios, las dos fuentes (supertriple y fosforita natural), los tres métodos (P-Bray, P-resinas y P-cítrico) y las dos profundidades de muestreo (0-7,5 y 0-15 cm; respectivamente cuadros 3.2 y 3.3). Además, para una discusión más general y a modo de resumen, en el cuadro 3.4 se presentan los promedios de EF para todos los sitios, agrupados por fuente de P, método y profundidad.

La mayor profundidad de muestreo implica necesariamente un mayor EF. Esto es por la mayor masa de suelo en la que se determina el aumento de P extractable. Asumiendo la densidad aparente del suelo, es posible calcular el EF teórico que tendría un suelo si la totalidad del P agregado permanece en forma extractable (y en el estrato de muestreo). Para una densidad aparente 1,25, este valor mínimo de EF sería 2.15 y 4,3 kg P₂O₅ ha⁻¹/ mg P kg⁻¹, para las profundidades 0-7,5 y 0-15cm, respectivamente.

Los valores estimados de EF por tipo de fuente (Cuadro 3.4.) difieren de los reportados por Castro *et al.* (1981b), donde los mayores EF eran para FN y menores para ST. Esto puede tener una o más de

las siguientes explicaciones. En el presente estudio se utilizó roca fosfórica de origen Gafsa, que se caracterizaría por ser más "blanda" o reactiva, en comparación con fosforitas de otros orígenes que se han utilizado. Esta mayor reactividad de la fosforita (respecto a estudios anteriores) resultaría en una mayor solubilización en el suelo, y -por lo tanto- en un menor EF. Además, la aplicación del fertilizante sin incorporación mecánica (es decir al voleo en superficie) resultaría en un mayor contacto del fertilizante con un suelo levemente más ácido ubicado en la capa más superficial. Esto también aumentaría la solubilización de la fosforita. Por otro lado, resultados de la presente publicación muestran que el P proveniente de la fuente soluble puede enriquecer el segundo estrato de muestreo (7.5-15 cm), lo cual no ocurre para la fosforita. En este proceso de movilización, el P podría ser objeto de fijación y resultar en un mayor EF. Por último cabe aclarar que el EF para la fosforita con el método P-Bray sería más alto que para ST, en virtud de la baja sensibilidad de este método respecto a FN, como se comenta en el siguiente párrafo.

El equivalente fertilizante presentó una alta variabilidad debida al suelo (o sitio). Para el **método Bray** y fertilización con ST, los valores de EF variaron entre 35 y 7 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5 cm y entre 23 y 10 para 0-15 cm. Cuando el fertilizante aplicado fue FN, la mayoría de las regresiones para la estimación de equivalente fertilizante resultaron no significativas estadísticamente. Este resultado era esperable, considerando que el P-Bray es poco sensible para detectar efectos en suelo cuando se utilizan fuentes no solubles. Similares resultados fueron reportados por Castro *et al.* (1981a). Para el **método de resinas** se reporta el EF para ambas fuentes. Para la fertilización con ST, los valores de EF variaron entre 30 y 4 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5 cm y entre 40 y 8 para 0-15 cm. Para la fertilización con FN, los valores de EF variaron entre 12 y 2 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5 cm y entre 20 y 5 para 0-15 cm. En promedio

para todos los sitios, el EF para el ST fue más alto que para la FN (14 vs 5 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5cm, y 20 vs 10 kg P_2O_5 /ha para 0-15cm). Esto indica que el método resinas tendría una mayor capacidad para extraer el P que proviene de la fosforita, comparado al proveniente de la fuente soluble. Por último, para el **método de ácido cítrico**, también se observa una variación importante en los valores de equivalente de fertilizante para los diferentes suelos estudiados. Para la fertilización con ST, los valores de EF variaron entre 19 y 5 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5 cm y entre 30 y 8 para 0-15 cm. Para la fertilización con FN, los valores de EF variaron entre 20 y 3 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5 cm y entre 24 y 7 para 0-15 cm. En promedio para todos los sitios, el EF para el ST fue más alto que para la FN (11 vs 8 kg P_2O_5 /ha para 0-7,5cm, y 18 vs 11 kg P_2O_5 /ha para 0-15cm). En este aspecto el P-cítrico tuvo un comportamiento similar a P-resinas, aunque menos consistente entre sitios.

Algunos sitios en particular se destacan por presentar un EF relativamente bajo para FN solamente. Estos suelos corresponden por ejemplo a los sitios de Pan de Azúcar, Palo a Pique, Isla Patrulla y Florida. Los mismos, se destacan por presentar tenores bajos de Ca intercambiable (menos de 6 meq/100g) y un pH menor o igual a 5,7. El sitio de Rincón presentó consistentemente un EF bajo, tanto para ST como para FN. Coincidentemente, este sitio también tiene bajo pH y bajo Ca.

Estudios anteriores indican que el EF puede depender también del nivel de P inicial en el suelo. Los suelos más empobrecidos tendrían un EF más alto, en comparación con suelos que se mantienen con niveles de P superiores a 16 mg kg^{-1} (Gutiérrez *et al.*, 2002). En el presente estudio, todos los sitios tuvieron historia sin fertilización fosfatada (excepto Ombúes y Palmitas), y por lo tanto se encontraban con baja disponibilidad inicial de P. Por lo tanto, es probable que el EF de estos suelos disminuya, una vez que son fertilizados periódicamente (Pérez Sababria *et al.*, 1981; y Rubio *et al.*, 2008).

Cuadro 3.2. Equivalente fertilizante (EF) en kg P_2O_5 /ha para la **profundidad de muestreo de 7.5 cm** según el tipo de fertilizante (superfosfato triple o fosforita) y el método de análisis de fósforo (Bray, resinas o ácido cítrico).

Sitio	Zona agroecológica	Superfosfato Triple			Fosforita Natural	
		Bray	Resinas	Cítrico	Resinas	Cítrico
Isla Patrulla	Sierras no rocosas del Este	18	23	15	6	-
Pan de Azúcar	Sierras rocosas del Este	35	30	19	7	4
Rincón de Ramírez	Bajos del Este	7	-	10	2	6
Palo a Pique	Lomadas del Este	18	20	15	4	4
Glencoe	Vertisol de basalto profundo	16	9	11	3	10
Tambores	Brunosol de basalto profundo	10	5	8	5	8
Tres Puentes	Sedimentarios del Noreste	15	21	14	12	11
Sauce Cañote	Bajos del Noreste	13	11	7	5	6
Trinidad	Sedimentos gravillosos / Cristalino	10	8	6	-	5
Florida	Cristalino	12	22	11	10	3
La Carolina	Sedimentos / Cristalino	14	12	11	3	6
Ombúes	Litoral Oeste / Libertad	7	4	5	3	8
Palmitas	Litoral Oeste / Cretáceo	12	8	14	6	20
Young	Litoral Oeste / Fray Bentos	10	9	8	5	8

Cuadro 3.3. Equivalente fertilizante (EF) en kg P₂O₅/ha para la **profundidad de muestreo de 15 cm** según el tipo de fertilizante (superfosfato triple o fosforita) y el método de análisis de fósforo (Bray, resinas o ácido cítrico).

Sitio	Zona agroecológica	Superfosfato Triple			Fosforita Natural	
		Bray	Resinas	Cítrico	Resinas	Cítrico
Isla Patrulla	Sierras no rocosas del Este	21	40	29	12	8
Pan de Azúcar	Sierras rocosas del Este	-	40	30	13	8
Rincón de Ramírez	Bajos del Este	10	12	11	-	-
Palo a Pique	Lomadas del Este	21	30	27	9	8
Glencoe	Vertisol de basalto profundo	23	14	17	10	15
Tambores	Brunosol de basalto profundo	18	12	10	7	16
Tres Puentes	Sedimentarios del Noreste	23	39	29	20	17
Sauce Cañote	Bajos del Noreste	17	14	10	6	8
Trinidad	Sedimentos gravillosos / Cristalino	14	13	12	5	7
Florida	Cristalino	22	-	-	14	7
La Carolina	Sedimentos / Cristalino	-	15	-	-	8
Ombúes	Litoral Oeste / Libertad	12	8	8	5	12
Palmitas	Litoral Oeste / Cretáceo	18	14	22	13	24
Young	Litoral Oeste / Fray Bentos	13	12	10	6	10

Cuadro 3.4. Valores promedio de equivalente fertilizante (EF) para todos los sitios, para superfosfato triple (ST) y fosforita natural (FN), según métodos de análisis de P en el suelo y profundidad de muestreo.

	Profundidad	Bray I	Resinas	Cítrico
Super triple	0-7,5 cm	15 e	15 de	11 cd
	0-15 cm	17 ef	20 f	16 e
Fosforita natural	0-7,5 cm	-	5 a	7 ab
	0-15 cm	-	9 bc	11 c

* EF= kg P₂O₅/ha para aumentar 1 mg P/kg de P en el suelo al momento de la fertilización.

CONCLUSIONES

- Los valores de equivalente fertilizante dependen del tipo de fuente fosfatada utilizada. En promedio, para los tres métodos evaluados, los EF para ST fueron mayores que para FN.
- La gran variación encontrada en los valores de EF para los diferentes suelos estudiados, muestra la necesidad de efectuar un manejo diferencial de la fertilización fosfatada en función del tipo de suelo, para poder corregir los valores de P al nivel óptimo de la pastura sembrada.
- El método P-Bray no permite detectar los cambios en el P extractable cuando se usa FN.

BIBLIOGRAFÍA

- BARROW, N** 1985. Comparing the effectiveness of fertilizers. *Fertilizer Research*, 8: 85-90.
- BARROW, N.; BOLAND, M.** 1990. A comparison of methods of measuring the effect of level of application on the relative effectiveness of two fertilizers. *Fertilizer Research*, 26: 1-10.
- BAETHGEN, W.; PÉREZ, J.M.** 1981. Efecto residual de la fertilización fosfatada en una rotación agrícola-ganadera. En: Fertilización de pasturas, INIA La Estanzuela. Montevideo: CIAAB. cap. 1, p. 1-17. (Miscelánea; 37)
- BOLAN, N.; WHITE, R.; HEDLEY, M.** 1990. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 30(2): 297-313.
- BOLLAND M; LEWIS, D.; GILKES, J.; HAMILTON, J.** 1997. Review of Australian phosphate rock research. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37(8): 845-859.
- BOSCHETTI, N.; QUINTERO, C.; BENAVIDEZ, A.** 1996. Residualidad del fertilizante fosfatado en pasturas consociadas en Entre Ríos (Argentina). *Ciencia del suelo*, 14: 20-23.
- BORDOLI, M.** 1998. Fertilización fosfatada de pasturas. En: JORNADA DE ACTUALIZACIÓN TÉCNICA EN PASTURAS (Concepción del Uruguay, Argentina, 13 nov. 1998). Concepción del Uruguay: INTA.
- CASANOVA, O.; BARBAZAN, M.; BARRRETO, P.** 2014. Tecnologías de fertilizantes. Curso de fertilidad de suelos. Facultad de Agronomía. UDELAR. http://portal.fagro.edu.uy/docs/uensenia/programas/fertilidad_suelos/manejo.pdf
- CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M. DE; BARBOZA, S.** 1981. Fertilización de pasturas en el Litoral Oeste del Uruguay. *Investigaciones Agronómicas (CIAAB)*, 2 (1): 56-67.
- CASTRO, J.L, ZAMUZ, E.M. DE; OUDRI, N.** 1981. Guía para fertilización de pasturas. En: Fertilización de pasturas, INIA La Estanzuela. Montevideo: CIAAB. cap. 8, p. 1-15. (Miscelánea; 37)
- COX, F.** 1994. Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. *Soil Science*, 58(4): 1249-1253.
- ESCUADERO, J; MORÓN, A.** 1978. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de distintos suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr., Montevideo (UY), Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 100 p.
- GARCÍA F.; PICONE, L.** 2004. Dinámica y manejo de fósforo en siembra directa. En: *Informaciones Agronómicas N° 55*. Instituto de la potasa y el fosforo: p.1-5.
- GUTIÉRREZ, F; SCHEINER, J; MOYANO, J; LAVADO, R.** 2002. Cambios en la disponibilidad de fósforo del suelo por el agregado de fertilizante. En: CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO (18o., 2002, Puerto Madryn, Argentina). [CD-Rom]
- MALLARINO, A.; PRATER, J.** 2007. Corn and soybean grain yield, P removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. En: PROCEEDING ANNUAL INTEGRATED (19o., Ames, Iowa, USA). Crop Management Conference, Ames, Iowa State University, p. 241-254.
- MALLARINO, A.** 2009. Long term phosphorus user studies and How They Effect Recommendation Philosophies. North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference. Des Moines, IA. v. 25. p. 5-12.

MALLARINO, A. 2013. Manejo nutricional para alta productividad de cultivos e impacto ambiental reducido. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 12: 7-14.

MORÓN, A. 1996. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (I). En: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. (eds.). *Manejo y fertilidad de suelos*, INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. p. 37-44. (Serie Técnica; 76)

MORÓN, A. 2002. Posibles usos de fosforitas para mejoramientos de pasturas en zonas ganaderas tradicionales en Uruguay. En: Risso, D.F.; Montossi, F. (eds.). *Mejoramientos de campo en la región de Cristalino: Fertilización; Producción de carne de calidad y persistencia productiva*, INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 97-113. (Serie Técnica; 129)

PÉREZ SANABRIA, J.; CASTRO, J.L.; MANZINI, E. 1981. Calibración de métodos de análisis para determinar la fertilización fosfatada del trigo. *Investigaciones Agronómicas (CIAAB)*, 2 (1): 74-79.

QUINTERO C.; BOSCHETTI, N.; BENAVIDEZ, R. 1997. Efecto residual y refertilización fosfatada de pasturas implantadas en Entre Ríos, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 15: 1-5.

QUINTERO, E.; BOSCHETTI, G.; BENAVIDEZ R. 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinian Mesopotamia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30(9 y 10): 1449-1461.

REYNAERT, E.; CASTRO, J. 1968. Eficiencia relativa de tres fertilizantes fosfatados en la fertilización inicial de pasturas. *Boletín Técnico (CIAAB)*, 7:1-24.

RISSE, D.; MORÓN; A.; ZARZA, A. 2002. Fuentes y niveles de fósforo para mejoramientos de campos en la región de cristalino. En: Risso, D.F.; Montossi, F. (eds.). *Mejoramientos de campo en la región de Cristalino: Fertilización; Producción de carne de calidad y persistencia productiva*, INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 115-151. (Serie Técnica; 129)

RUBIO; G.; CABELLO, M.; GUTIÉRREZ, F. 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in Mollisols. *Soil Science*, 72(6):1721-1727.

RUSSELL, J. S. 1977. Evaluation of residual nutrient effects in soils. *Australian Journal of Agricultural Research*, 28(3): 461-475.

ZAMALVIDE, J.; CASANOVA, O.; GENTA, H.; MALLARINO, A. 1975. Evolución del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. Tesis Ing Agr., Montevideo (UY), Universidad de la República, Facultad de Agronomía. 55 p.

ZAMUZ, E.M. DE; CASTRO, J. 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelo para determinar fósforo asimilable. *Boletín Técnico (CIAAB)*, 15:1-15.

ZAMUZ, E.M. DE; CASTRO, J. 1981. Comparación de métodos para estimar fósforo disponible en suelos con diferentes fertilizaciones previas. *Investigaciones Agronómicas (CIAAB)*, 2: 8-15.

4. Eficiencia relativa de la fertilización con fosforita natural respecto a superfosfato

Quincke, A.¹; Cuadro, R.²; Giorello, D.²; Bermúdez, R.³

INTRODUCCIÓN

La fosforita natural (FN) o roca fosfórica es la materia prima que la industria utiliza en la producción de las fuentes solubles, por lo que su precio es menor que el de los fertilizantes solubles. Debido a que la FN contiene P en forma no soluble, es necesario considerar que el P no se libera en forma inmediata. Por lo tanto, generalmente se espera una menor respuesta vegetal si se compara con fuentes solubles como el superfosfato triple (ST).

La Eficiencia Relativa (ER) de la FN es una medida de la efectividad agronómica de esta fuente de P que se expresa en forma relativa a una fuente soluble. Se define como el cociente entre las respuestas en producción de la FN y el ST (Zapata & Roy, 2007). Un valor de ER=1 (ó 100%) indica que la FN tiene igual eficiencia que el ST. Si la ER es menor que 1, la productividad con FN es menor que con ST, y viceversa. La eficiencia relativa de la FN depende de las propiedades intrínsecas de la roca fosfórica (solubilidad en ácido cítrico neutro), del tamaño de partículas, de las propiedades del suelo y de las especies y variedades que componen la pastura (Khasawneh y Doll, 1978). Respecto a las propiedades del suelo, la FAO (2007) señala que la solubilización de las rocas fosfóricas se favorece con suelos más ácidos, con una alta capacidad de intercambio catiónico, niveles bajos de calcio y de fosfato en solución, y un alto contenido de materia orgánica. De forma más simple, resultados obtenidos en Nueva Zelanda indican que la fosforita natural puede ser tan efectiva como los fertilizantes solubles en suelos con pH menor a 6 y con más de 800 mm de lluvia anual (Bolan *et al.*, 1990).

A nivel nacional, diversos estudios determinaron la ER para distintos tipos de pasturas y suelos del país (Reynaert y Castro, 1968; Morón, 1982; Morón *et al.*, 1982; Bermúdez *et al.*, 2000; Morón, 2002; Risso *et al.*, 2002; Ferres *et al.*, 2003; Ayala y Bermúdez, 2008). Por ejemplo, midiendo la producción acumulada de varios años de pasturas de leguminosas, Morón (2007) reporta una ER de 1,30 para un suelo de Cristalino central. En otro estudio para la misma región (Risso *et al.*, 2007) se obtuvieron valores entre 0,72 y 1,17. Para el caso de suelos sobre Basalto, se obtuvieron valores de ER entre 0,58 y 1,35 (Risso *et al.*, 2014; Morón, 2007). En los estudios de ambas regiones mencionadas, los bajos valores de ER se asociaron al año 1 ó 2 de la pastura. En el Cristalino Este se reportaron valores de 1,80 con pasturas de trébol blanco y lotus (Morón, 2007) y 1,84 (Bermúdez *et al.*, 2000). Para suelos del Noreste se reportó una ER de 85% (Reynaert y Castro, 1968).

Estos ejemplos dan cuenta de la variabilidad en la ER, que se puede explicar por varios factores, incluyendo diferencias entre suelos, la edad y el tipo de la pastura, propiedades de la roca fosfórica, formas de aplicación al suelo, etc. El objetivo del trabajo fue determinar la eficiencia relativa de la fosforita natural respecto al superfosfato triple (ST) para trébol blanco y lotus en diferentes suelos del Uruguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

La base experimental fue la red de experimentos de fertilización de pasturas, objeto de la presente publicación. Fueron 14 sitios ubicados sobre diversos suelos en las principales zonas ganaderas del país (más detalles

¹ Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

² Ing. Agr., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

³ Ing. Agr. MPhil., hasta 2015 Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Treinta y Tres.

en capítulo 1 de esta publicación). Además del testigo sin agregado de P (tratamiento 1), se utilizaron los tratamientos 5-9 y 13-17, que se corresponden a dosis de 40, 80, 120, 240, 360 kg de P_2O_5 ha⁻¹ en el año de instalación y refertilizaciones de 10, 20, 30, 60 y 90 kg de P_2O_5 ha⁻¹ en los años subsiguientes (cuadro 1.4 del capítulo 1). La producción de forraje fue evaluada con cortadora de pasto y canasto colector, con previa estimación visual de la composición botánica, para determinar la productividad anual de materia seca (kg de materia seca ha⁻¹ año⁻¹) de trébol blanco o lotus. En el primer año de la pastura hubo condiciones climáticas adversas y no se obtuvieron registros de producción.

Los dos fertilizantes utilizados fueron fosforita natural de Argelia (0-10/29-0; FN) y superfosfato triple (0-46/46-0; ST). Cabe recordar que para la fosforita la "solubilidad" del P que se reporta (en este caso 10%) no es determinada en agua sino en ácido cítrico al 2%.

Para la determinación de la eficiencia relativa de la fosforita se utilizó la producción acumulada de los años 2 y 3. Para cada nivel de

dosis de P y ambas fuentes se determinó la respuesta en productividad respecto al tratamiento sin fertilización. Se calculó la ER de la FN respecto al ST como el cociente entre la producción de trébol blanco o Lotus de los tratamientos con FN respecto a ST. Para el análisis estadístico se utilizó una prueba t para una muestra única, bajo la hipótesis nula de que la media de la ER es igual a 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de eficiencia relativa están resumidos en el cuadro 4.1. Se observa una alta variabilidad entre sitios, con valores que oscilaron entre 0,67 y 2,45. En el caso de Ombúes hubo alta producción de forraje, pero con baja respuesta a la fertilización. En el caso de Isla Patrulla también se registró baja respuesta. Por esta razón no se reporta la ER para estos dos sitios. El error de la estimación de ER también fue variable, con el caso de Lotus en Rincón de Ramírez registrando el mayor desvío estándar. Esto explicaría por qué en ese caso la ER de 2,45 no resultó significativa estadísticamente.

Cuadro 4.1. Eficiencia relativa (ER) de la fosforita natural respecto a superfosfato triple para trébol blanco y Lotus en los diferentes sitios experimentales.

Sitio	Zona agroecológica	Trébol blanco		Lotus	
		Eficiencia relativa	Desvío estándar	Eficiencia relativa	Desvío estándar
Isla Patrulla	Sierras no rocosas del Este				
Pan de Azúcar	Sierras rocosas del Este	1.26*	0.33	1.59*	0.90
Rincón de Ramírez	Bajos del Este	1.04	0.21	2.45	3.38
Palo a Pique	Lomadas del Este	2.05*	1.85	1.29	0.87
Glencoe	Vertisol de basalto profundo	0.96	0.36	0.99	0.78
Tambores	Brunosol de basalto profundo	0.90	0.27	1.39	0.97
Tres Puentes	Sedimentarios del Noreste	1.01	0.31	1.20	0.39
Sauce Cañote	Bajos del Noreste	0.96	0.27	1.29	0.58
Trinidad	Sedimentos gravillosos /Cristalino	1.15	0.38		
Florida	Cristalino	0.83*	0.20	1.08	0.72
La Carolina	Sedimentos /Cristalino	0.67*	0.29	0.87	0.35
Ombúes	Litoral Oeste /Libertad				
Palmitas	Litoral Oeste /Cretáceo	0.96	0.75	1.25	1.34
Young	Litoral Oeste /Fray Bentos	0.97	0.22	1.04	0.32

El (*) indica que la eficiencia relativa es significativamente distinta de 1 (alfa = 0,05).

La ER fue significativamente menor a 1 únicamente en los casos de La Carolina y Florida para trébol blanco. Por el contrario, para un número de sitios no se encontraron diferencias significativas entre fuentes, con valores de ER cercanos a 1. Estos resultados contradicen la hipótesis general de una menor eficiencia de la fosforita, pero a la vez confirman algunos resultados de estudios anteriores. En el caso particular del presente estudio, deben recordarse 3 aspectos que podrían explicar una mayor ER respecto a estudios anteriores. Un aspecto es que la fosforita empleada, debido a sus características, sería un material de mayor reactividad comparado con fosforitas de otros orígenes,

y que por lo tanto reaccionaría más rápidamente en el suelo para proveer P a las plantas. Otro aspecto es la forma de aplicación al suelo, que no fue con incorporación y en suelo laboreado, sino al voleo en cobertura sobre suelos sin historia agrícola. De esta manera el fertilizante se ubicó sobre la capa más superficial del suelo, que normalmente es más rica en materia orgánica y levemente más ácida que el promedio del suelo en la capa arable. Estas condiciones son más favorables para la solubilización de la fosforita. Por último, es importante recordar que los resultados reportados aquí corresponden a respuestas en segundo y tercer año después de la primera aplicación de los fertilizantes.

Debido a una menor disponibilidad de P con la fosforita, es posible que la respuesta en el primer año sea más favorable para las fuentes solubles.

En los suelos del Este se encuentran resultados de ER claramente mayores a 1 (por ejemplo Pan de Azúcar y Palo a Pique). Estos resultados confirman resultados anteriores de Morón (2007) y Bermúdez *et al.* (2000). Además, resultados del presente estudio indican que estos suelos en particular tendrían un equivalente fertilizante relativamente alto para supertriple, pero bajo para fosforita (capítulo 3). Esto significa que luego de fertilizar con una misma dosis de P, la disponibilidad de P (medida p.ej. con el método de ácido cítrico) sería mayor para fosforita que para supertriple.

Algunas propiedades químicas de los suelos de este estudio (capítulo 1) explican parte de la variabilidad en ER. Casos con mayores ER se asociaron a suelos con pH más bajo, y también valores más bajos de calcio intercambiable, % saturación de bases y % arcilla. Esto es claramente coincidente con Morón (2002), al concluir que los principales factores de suelo que controlan la ER serían el porcentaje de saturación en bases, al pH y al contenido de calcio intercambiable del suelo.

CONCLUSIONES

Los suelos en que la fosforita tendría consistentemente una mayor eficiencia respecto a supertriple (o sea ER mayor a 100%) serían los suelos de las Sierras rocosas del Este (Pan de Azúcar), Lomadas del Este (Palo a Pique) y Bajos del Este (Rincón de Ramírez). En otros suelos, donde la ER es menor a 100%, también puede ser recomendable la fosforita por una relación de precios más favorable.

Los resultados de alta eficiencia relativa observada para los sitios del Este son coincidentes con la mayoría de los estudios anteriores. Para los sitios sobre Cristalino, no se esperaba que el suelo de Florida (unidad San Gabriel-Guaycurú) tuviera una ER menor a 100% en trébol blanco, considerando las propiedades químicas del suelo y resultados de estudios anteriores. No se cuenta con una explicación satisfactoria de este resultado. En cambio, los bajos valores de ER obtenidos en La Carolina (en comparación con Trinidad y Florida) se explicarían por el mayor contenido de calcio intercambiable y la mayor saturación de bases.

Es preciso recordar que los resultados presentados reflejan la eficiencia de la fosforita para los años subsiguientes al año de instalación. No se proveen resultados de eficiencia para el primer año por un problema generalizado de implantación y producción en el primer año.

BIBLIOGRAFÍA

AYALA, W; BERMÚDEZ, R. 2008. Fertilización fosfatada sobre mejoramientos de campo con lotus cv. El Rincón y lotus cv. Maku en suelos superficiales. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.) Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA, p. 51-61 (Serie Técnica; 172)

BERMÚDEZ, R.; CARÁMBULA, M.; AYALA, W. 2000. Estudio comparativo de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre el comportamiento productivo de un mejoramiento extensivo con trébol blanco y lotus. En: Jornada anual de producción animal: resultados experimentales. Unidad Experimental Palo a Pique. Treinta y Tres: INIA Treinta y Tres. p. 17-24 (Serie Actividades de Difusión; 225)

BOLAN, N.S.; WHITE, R.E.; HEDLEY, M.J. 1990. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 30(2): p. 297-313

BOLAN, M.D.S.; LEWIS, D.C.; GILKES, R.J.; HAMILTON. 1997. Review of Australian phosphate rock research. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 37: p. 845-859.

FAO. 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Roma: FAO. 155 p. (Boletín FAO Fertilizantes y nutrición vegetal; 13)

FERRÉS, S; QUEHEILLE, P.M.; RIET, I. 2003. Fertilización fosfatada en mejoramientos de campo en la Región Este. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Facultad de Agronomía, Universidad de la República., 151 p.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E. C. 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Advances in Agronomy* vol. 30 p 159-206

MORÓN, A. 1982. I. Fuentes de fósforo para pasturas En: Fuentes de fósforo para pasturas. Estanduela, Colonia: CIAAB. p.1-24 (Miscelánea; 42)

_____. BEMHAJA, M.L.; CASTRO. E. 1982. II. Comparación de fuentes de fósforo para pasturas en un suelo de basalto. En: Fuentes de fósforo para pasturas. Estanduela, Colonia: CIAAB. p.1-9 (Miscelánea; 42)

_____. 2002. Posibles usos de fosforitas para mejoramientos de pasturas en zonas ganaderas tradicionales en Uruguay. En: Risso, D.F.; Montossi, F. (eds.). Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino: Fertilización, producción de carne de calidad y persistencia productiva. INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 97-113 (Serie Técnica; 129)

_____. 2008. Fertilización de pasturas: Respuesta y relación de precios para la producción de carne y leche. in: *Informaciones agropecuarias* 40.

REYNAERT, E.E.; CASTRO, J.L. 1968. Eficiencia relativa de tres fertilizantes fosfatados en la fertilización inicial de pasturas. Estanduela, Colonia: CIAAB. 24 p. (Boletín Técnico; 7)

RISSE, D.F.; MORÓN, A.; ZARZA, A. 2002. Fuentes y niveles de fósforo para mejoramientos de campos en suelos de la región de cristalino. En: Risso, D.F.; Montossi, F. (eds.). Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino: Fertilización, producción de carne de calidad y persistencia productiva. INIA Tacuarembó. Montevideo: INIA. p. 115-150 (Serie Técnica; 129)

5. Variación del P extractable por variación del contenido hídrico del suelo

Quincke, A.¹

INTRODUCCIÓN

Durante los meses de abril y mayo, momento en que se hace el muestreo de suelos para la recomendación de fertilización con fósforo (P) en trébol blanco o lotus, los suelos pueden encontrarse con diversos contenidos de agua. La saturación de agua y consecuente falta de oxígeno pueden provocar aumentos en los valores de P extractable (p. ej. P- Bray I). Este proceso es relevante en cultivos inundados (como el cultivo de arroz), pero puede ser importante también en suelos no inundados donde ocurren condiciones temporarias de anaerobiosis (Hernández, 2008).

Al inundarse un suelo el valor de pH tiende a la neutralidad, tanto en suelos ácidos (excepto en aquellos bajos en hierro) como en alcalinos (Ponnamperuma, 1972). Dicho cambio puede tardar varias semanas dependiendo del tipo de suelos, niveles de materia orgánica, actividad microbiana y otras propiedades químicas del suelo (Snyder y Slaton, 2002). La disponibilidad de P es máxima en un rango de pH que oscila entre 5,5 y 6,5. Otra consecuencia de la falta de oxígeno en el suelo es la disminución del potencial redox (Eh), determinando que el hierro férrico (Fe^{+3}) sea utilizado como aceptor de electrones y sea reducido a hierro ferroso (Fe^{+2}) Sah *et al.*, 1989). Esto puede provocar aumentos del P extractable a causa de la liberación del P adsorbido a los óxidos de hierro. Al culminar el período de anegamiento del suelo, la reoxidación del hierro ferroso provoca un incremento en la capacidad de retención del P y, por lo tanto, una disminución del P extractable (Ferrando *et al.*, 2002; Hernández, 2008).

También es posible que existan variaciones del contenido de P extractable en suelos en capacidad de campo, es decir con aireación normal (o suelo no anegado). La mineraliza-

ción de la materia orgánica del suelo podría aportar a las fracciones de P extractable. En los suelos del tipo molisoles y vertisoles, como la mayoría de los suelos de este estudio, el P de la fracción orgánica del suelo puede representar del 40 a 80% del P total del suelo (Picone y Zamuner, 2002).

Por los procesos mencionados, al realizar el muestreo de suelo podrían cuantificarse cantidades de P extractable que no serían representativas de las condiciones normales en las que se desarrollará el cultivo. El objetivo del estudio presentado aquí fue evaluar las variaciones de P extractable por los métodos Bray I y ácido cítrico en condiciones de exceso hídrico y a capacidad de campo. Es importante mencionar que se simuló condiciones extremas de saturación con agua en el suelo, las cuales no serían las condiciones de saturación que ocurren normalmente en condiciones de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se utilizaron muestras de suelos de 12 sitios de la red de fertilización de pasturas, las cuales fueron colectadas en el año 2011 a una profundidad de 0 a 15 cm. De cada sitio se muestrearon el tratamiento testigo y el tratamiento 6 (por más detalles ver Capítulo 1 de esta publicación). Se realizó un estudio de incubación en condiciones controladas de laboratorio para someter a los distintos suelos a dos niveles contrastantes de humedad.

Previo al tratamiento de incubación, a cada suelo se le hicieron las siguientes determinaciones (Cuadro 5.1): carbono orgánico mediante el método de combustión seca a 900°C y detección con infrarrojo utilizando un equipo LECO Truspec (Wright y Bailey,

¹ Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

2001); pH en agua; óxidos de Fe extraídos con oxalato de amonio (FeOXAL) y óxidos de Fe extraídos con ditionito (FeDIT) (Kilmer, 1960); textura (Bouyoucos, 1962); P extractable por los métodos Bray I (P-Bray) y del ácido cítrico (P-cítrico).

Los tratamientos de incubación se realizaron en sub-muestras de 50 g colocadas en recipientes plásticos de 100 cm³ de capacidad. Las sub-muestras fueron asignadas a dos contenidos de agua durante la incubación: 1) sin exceso de agua (aeróbicas), con un con-

tenido de 70% (p/p) de capacidad de campo; y 2) con exceso de agua (anegadas), con una lámina de 25 mm de agua libre por encima de la muestra. Los suelos se incubaron a 20°C, durante periodos de tiempo de 1, 2, 3, 4 y 5 semanas. Se realizaron cuatro repeticiones por contenido de agua y semana de incubación. Al cabo de cada semana de incubación, a cada sub-muestra se determinó, en extracto húmedo, el P extractable por ambos métodos (P-Bray y P-cítrico). Además, a las muestras anegadas se les determinó pH y potencial redox (Eh_{pH7}).

Cuadro 5.1. Sitios originarios de cada suelo y variables caracterizadas para cada sitio antes de la incubación.

Sitio	Fertilización	pH	P (mg kg ⁻¹)		C org %
			P-Bray	P-cítrico	
La Carolina	testigo	5,7	6	3	3,88
La Carolina	fertilizado	5,4	6	4	3,51
Trinidad	testigo	5,1	2	1	1,41
Trinidad	fertilizado	6,0	3	2	1,73
Pan de Azúcar	testigo	5,6	2	2	2,02
Pan de Azúcar	fertilizado	5,6	2	2	2,03
Palo a Pique	testigo	5,6	2	3	1,77
Palo a Pique	fertilizado	5,5	4	4	1,77
Isla Patrulla	testigo	5,6	2	1	2,06
Isla Patrulla	fertilizado	5,6	3	2	2,25
Tres puentes	testigo	5,6	2	1	2,39
Tres puentes	fertilizado	5,4	4	3	2,52
Rincón	testigo	5,5	2	2	1,69
Rincón	fertilizado	5,4	4	3	1,93
Sauce Cañote	testigo	5,5	2	3	2,34
Sauce Cañote	fertilizado	5,5	6	5	2,84
Tambores	testigo	5,9	4	2	4,52
Tambores	fertilizado	5,8	6	3	4,20
Glencoe	testigo	5,5	7	5	2,89
Glencoe	fertilizado	5,4	5	5	2,85
Ombúes	testigo	5,7	4	2	3,65
Ombúes	fertilizado	5,7	7	7	3,94
Young	testigo	5,7	3	2	2,65
Young	fertilizado	5,7	4	3	2,65

Sitio	Fertilización	FeOXAL	FeDIT	FeOXAL/ FeDIT	Ar	L	Ac
		—————%—————			—————%—————		
La Carolina	testigo	0,57	1,02	0,56	43	28	29
La Carolina	fertilizado	0,54	0,84	0,64	43	20	37
Trinidad	testigo	0,52	0,65	0,79	63	21	16
Trinidad	fertilizado	0,59	0,62	0,95	59	22	18
Pan de Azúcar	testigo	0,50	0,64	0,79	43	38	19
Pan de Azúcar	fertilizado	0,40	0,56	0,70	45	39	17
Palo a Pique	testigo	0,38	0,51	0,74	43	38	19
Palo a Pique	fertilizado	0,39	0,51	0,76	49	33	18
Isla Patrulla	testigo	0,38	2,06	0,18	26	44	30
Isla Patrulla	fertilizado	0,31	2,14	0,15	26	44	30
Tres puentes	testigo	0,40‡	0,64	0,63	32	30	38
Tres puentes	fertilizado	0,31	0,54	0,58	41	30	29
Rincón	testigo	0,24	0,22	1,11	40	36	24
Rincón	fertilizado	0,22	0,17	1,26	38	38	24
Sauce Cañote	testigo	0,30	0,32	0,92	48	28	25
Sauce Cañote	fertilizado	0,32	0,29	1,11	54	26	21
Tambores	testigo	0,53	0,76	0,70	48	28	25
Tambores	fertilizado	0,35	0,80	0,44	33	33	34
Glencoe	testigo	0,49	0,66	0,74	19	53	29
Glencoe	fertilizado	0,51	0,68	0,75	36	40	24
Ombúes	testigo	0,55	0,94	0,58	38	24	38
Ombúes	fertilizado	0,62	0,72	0,86	38	25	37
Young	testigo	0,57	0,59	0,97	44	23	33

† Fertilización recibida por la parcela muestreada, testigo: sin fertilización con P, fertilizado: fertilizado con 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ en el año de siembra y refertilizado con 20 kg ha⁻¹ año⁻¹. ‡ C org: porcentaje de carbono orgánico; FeOXAL_{pre}: óxidos de hierro extraídos con oxalato de amonio, previo al tratamiento de incubación; FeDIT_{pre}: óxidos de hierro extraídos con ditionito de sodio, previo al tratamiento de incubación; Ar: porcentaje de arena; L: porcentaje de limo; Ac: porcentaje de arcilla.

Fueron empleados diferentes métodos estadísticos, incluyendo métodos de análisis multivariado. No obstante, los resultados

que se presentan en este trabajo fueron obtenidos principalmente con métodos de regresión lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fósforo extractable durante la incubación en aerobiosis

En las muestras incubadas en condiciones de aerobiosis, el tiempo de incubación provocó cambios ($p < 0,001$) de -2 a 8 mg kg^{-1} en los niveles de P-Bray I y de -2 a 10 mg kg^{-1} en los niveles de P-Cítrico (datos no mostrados). Las máximas variaciones observadas afectarían la interpretación de la disponibilidad de P del suelo. Es factible suponer que durante el transcurso de cinco semanas de incubación de un suelo húmedo en condiciones aeróbicas los contenidos de P extractable podrían presentar cambios significativos. Para el caso particular de la incubación en aerobiosis de este estudio, las muestras fueron previamente secadas, molidas y posteriormente rehumedecidas. Por lo tanto, esta perturbación del suelo pudo favorecer las condiciones de mineralización de la materia orgánica, lo que generaría liberación de P. Las condiciones de perturbación del suelo en este estudio pueden haber generado una mayor mineralización que la esperable en condiciones naturales del suelo. En condiciones de campo, las variaciones de P extractable serían menores. Es importante considerar que durante el muestreo del suelo se perturba y oxigena la muestra, lo cual favorece la mineralización de la materia orgánica. Por lo tanto es necesario minimizar el tiempo entre el muestreo hasta el ingreso de las muestras al laboratorio, ya que pueden ocurrir cambios significativos en el P extractable si el tiempo transcurrido es excesivo. Acorde a lo observado, tiempos menores a dos semanas entre el muestreo y secado de la muestra para el análisis, no introducirían errores significativos.

Fósforo extractable durante la incubación de muestras anegadas

Durante el período de incubación de las muestras anegadas, los valores de $E_{h_{pH7}}$ disminuyeron en las primeras 3 semanas, luego se pudo asumir que el potencial redox se mantuvo constante en un valor de -9 mV (Figura 5.1.; $R^2 = 0,75$). Los valores de pH aumentaron durante la incubación hasta alcanzar un valor constante de 6,7 luego de la semana 4 (Figura 5.2.; $R^2 = 0,67$). Este comportamiento era esperable según lo expuesto por Snyder y Slaton (2002) quienes observaron que en suelos alcalinos el pH se reduce y en suelos ácidos el pH aumenta durante un período de anegamiento. El valor de pH alcanzado es próximo al rango de pH al que sería máxima la disponibilidad de P, ya que en un suelo ligeramente ácido ocurre la mayor solubilidad simultánea de los fosfatos de calcio, hierro y aluminio (Ponnamperuma, 1972; Bohn, 2001; Kulhánek *et al.*, 2009). Si asumimos que el Fe férrico comienza a pasar a Fe ferroso a valores de $E_{h_{pH7}}$ de entre 300 mV y 100 mV a valores de pH entre 6 y 7 (Gotoh y Patrick, 1974), podemos suponer que esto ocurrió a partir de las 1,3 semanas de anegamiento. En este ensayo se favorecieron las condiciones para que descendiera el potencial redox del suelo. Los valores alcanzados de $E_{h_{pH7}}$ y pH, se corresponden con los valores esperables para suelos anegados según Bohn (2001). En un cultivo de pasturas, sin embargo, el potencial redox no presentaría descensos de esta magnitud, salvo condiciones excepcionales de exceso hídrico.

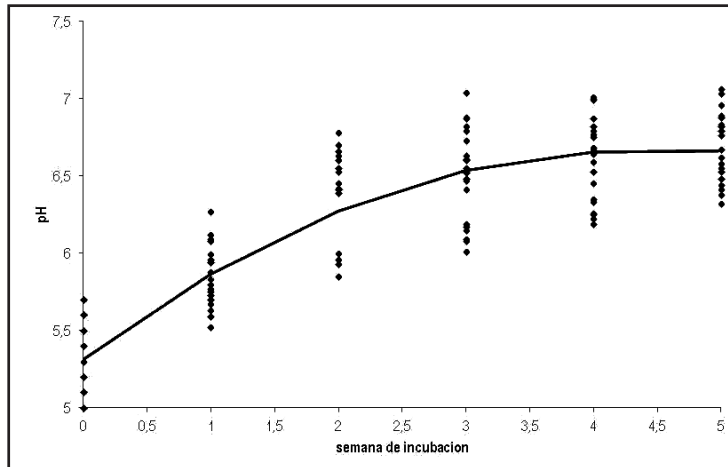


Figura 5.1. Valores promedio de pH durante el período de incubación de las muestras anegadas.

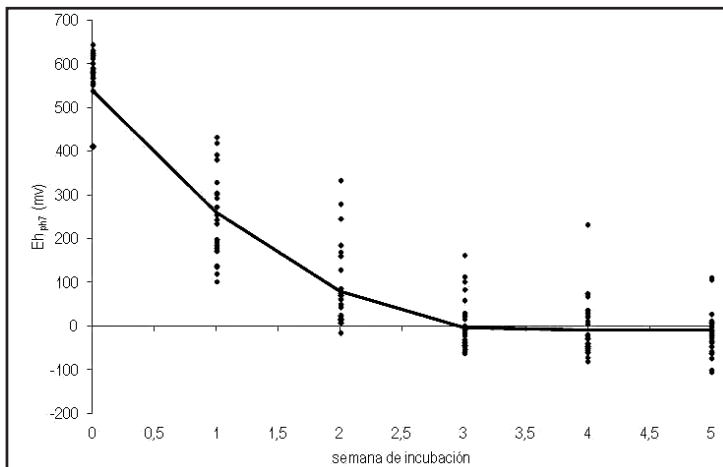


Figura 5.2. Valores promedio de Eh_{pH7} (mV) durante el período de incubación de las muestras anegadas.

En las muestras incubadas en anegamiento los valores de P-Bray y P-cítrico aumentaron en función del tiempo para la mayoría de los sitios (Cuadros 5.3a y b). En términos generales observamos un incremento desde la primera semana de incubación, pero para algunos sitios los valores máximos se alcanzaron a partir de la tercera semana, mientras que para otros aún en la quinta semana hubo incremento del P extractable. En la bibliografía consultada se reportan aumentos del P extractable desde el segundo día de anegamiento hasta los dos meses (Aldous *et al.* 2007; Obour *et al.*, 2011; Tian *et al.*, 2008). Hernández *et al.* (2013), observaron para diversos sue-

los de Uruguay, aumentos del P Bray I inicial, de entre 2,6 y 4,1 veces, al incubar suelo durante 3 a 7 días, respectivamente. Los incrementos cuantificados en el presente trabajo, de hasta 15 veces respecto al valor inicial, son notoriamente mayores a los observados por otras investigaciones nacionales (Ferrando *et al.*, 2002). Las mayores variaciones aquí analizadas se pudieron deber a las diferencias en las condiciones de anegamiento, ya que Ferrando *et al.* (2002) incubaron con un máximo de 5% de agua por encima del contenido de agua a capacidad de campo, mientras en este trabajo se incubaron los suelos con una lámina de agua libre.

En los sitios Isla Patrulla y Tambores, no se observó variación de los valores de P-Bray en función del tiempo de incubación en anaerobiosis. Esto se podría explicar porque el contenido de FeDIT fue mayor a 0,71 en ambos sitios. El hierro cuantificado por la extracción con ditionito sería más difícil de reducir, por lo que es posible que en estos sitios la reducción del Fe^{+3} a Fe^{+2} haya sido menor y, por ende, haya ocurrido

menor liberación de P adsorbido al hierro. Con respecto a las mediciones de P-cítrico en todos los sitios hubo variación del contenido de P en función del tiempo de incubación. Estas diferencias entre las variaciones de P-Bray y P-cítrico durante la incubación podrían deberse a que los métodos difieren en los mecanismos de extracción de P y en la capacidad de extraer P de las diferentes fracciones de P.

Cuadro 5.2a. Valores de P-Bray al término de cada semana de incubación del suelo en condiciones anaerobias.

Sitio	Tratamiento	Semana de incubación						Máxima variación observada
		0	1	2	3	4	5	
		P -Bray (mg kg ⁻¹)						
La Carolina	testigo	6	11	13	19	18	15	13
La Carolina	fertilizado	6	12	14	22	23	16	17
Trinidad	testigo	2	4	7	10	24	18	22
Trinidad	fertilizado	3	7	10	13	30	21	27
Pan de Azúcar	testigo	2	10	10	12	18	24	22
Pan de Azúcar	fertilizado	4	10	13	15	19	24	20
Palo a Pique	testigo	2	8	10	15	13	16	14
Palo a Pique	fertilizado	2	12	11	19	20	23	21
Isla Patrulla	testigo	2	3	4	10	3	3	7
Isla Patrulla	fertilizado	3	4	5	9	4	4	7
Tres Puentes	testigo	2	10	12	13	16	16	14
Tres Puentes	fertilizado	4	14	18	20	24	24	20
Rincón	testigo	2	12	20	17	16	17	18
Rincón	fertilizado	4	15	22	20	21	21	18
Sauce Cañote	testigo	3	14	22	22	25	27	24
Sauce Cañote	fertilizado	6	21	31	30	35	39	33
Tambores	testigo	4	11	11	12	14	10	11
Tambores	fertilizado	6	14	13	14	17	13	11
Glencoe	testigo	7	12	16	20	25	25	18
Glencoe	fertilizado	5	10	17	20	20	26	22
Ombúes	testigo	4	10	13	18	18	15	15
Ombúes	fertilizado	7	13	14	21	23	17	16
Young	testigo	3	5	8	9	18	14	15
Young	fertilizado	4	7	10	12	23	19	19

Al igual que en la incubación aeróbica, la historia de fertilización con P favoreció el incremento de P extractable durante la incubación anaeróbica (Cuadros 5.2 a y

b). Esto coincide con los observado por Ferrando *et al.* (2002) y Hernández *et al.* (2013), en suelos destinados al cultivo de arroz.

Cuadro 5.2b. Valores de P-cítrico al término de cada semana de incubación del suelo en condiciones anaerobias.

Sitio	Tratamiento	—Semana de incubación—						Máxima variación observada
		0	1	2	3	4	5	
		P-cítrico (mg kg ⁻¹)						
Glencoe	testigo	5	10	16	19	23	23	18
Glencoe	fertilizado	5	9	19	20	24	27	22
Isla Patrulla	testigo	1	2	3	6	3	4	5
Isla Patrulla	fertilizado	2	3	5	6	5	6	4
Trinidad	testigo	1	4	9	11	13	16	15
Trinidad	fertilizado	2	5	13	17	21	23	20
Pan de Azúcar	testigo	3	12	17	21	20	28	25
Pan de Azúcar	fertilizado	4	13	20	25	24	32	28
La Carolina	testigo	3	9	13	23	25	15	22
La Carolina	fertilizado	4	11	15	25	27	19	23
Palo a Pique	testigo	2	11	17	20	16	22	20
Palo a Pique	fertilizado	2	16	18	22	24	28	26
Ombúes	testigo	2	9	13	21	25	17	23
Ombúes	fertilizado	7	14	16	26	27	21	20
Rincón	testigo	2	10	10	13	12	13	11
Rincón	fertilizado	3	12	14	15	15	16	13
Tres Puentes	testigo	1	7	8	11	15	13	14
Tres Puentes	fertilizado	3	10	13	16	18	16	15
Tambores	testigo	2	7	7	10	11	10	10
Tambores	fertilizado	3	10	11	12	15	13	12
Young	testigo	2	5	9	10	12	15	14
Young	fertilizado	3	7	11	14	19	20	17
Sauce Cañote	testigo	3	9	17	14	16	20	17
Sauce Cañote	fertilizado	5	15	24	22	28	30	25

Además del tiempo de incubación, la magnitud de los aumentos de P-Bray y P-cítrico en los tratamientos anegados se debió a los mayores valores de: pH_{pre} ; carbono orgánico; FeOX_{pre} ; y $\text{FeDIT}_{\text{pre}}$ de cada sitio. Esto coincide con las tendencias observadas por Tian *et al.* (2008) y Darilekab *et al.* (2011), quienes también identificaron que los principales factores que afectaron a la liberación de fosfato al agua de inundación fueron Eh, Fe^{+2} , Fe^{+3} y el carbono orgánico disuelto. Al transcurrir el tiempo de incubación, como se mencionó anteriormente, los valores de Eh_{pH7} disminuyeron y los valores de pH aumentaron. Estos cambios explicarían una parte significativa de los aumentos de P extractable. No sería posible, sin embargo, estimar confiablemente la variación de P extractable en un suelo anegado en estas condiciones, ya que el error de estimación sería significativo.

Por último, cabe señalar que el incremento en P extractable debido al anegamiento se verifica con las muestras analizadas tanto en extracto húmedo como en extracto seco (datos no mostrados). Es decir, el secado de 48°C (que se realiza rutinariamente en el proceso de análisis de laboratorio) no revierte el aumento temporal de P extractable debido a un exceso de agua previo al muestreo del suelo.

CONCLUSIÓN

Los aumentos de P extractable ocasionados por el anegamiento (asociados al aumento de la acidez y la disminución del potencial redox del suelo), podrían inducir a errores en el diagnóstico de la fertilización en la mayoría de los sitios evaluados. Por tal motivo, para el diagnóstico de fertilización de cultivos forrajeros y/o graníferos, no sería aconsejable el muestreo de suelo si el mismo está temporalmente anegado por un período mayor a una semana. Que este tipo de anegamientos efectivamente ocurran dependerá también del drenaje natural del suelo. El muestreo de suelo debe hacerse cerca de la fecha en que se realizó el muestro para esta guía de fertilización de pasturas, para minimizar las variaciones que puedan existir, aun en condiciones normales de humedad en el suelo. Al extraer una muestra de suelo con un contenido de humedad a capacidad de campo, es necesario minimizar el tiempo hasta secado en estufa, pues pasadas las dos semanas es posible que se introduzcan errores significativos al medir P-Bray o P-cítrico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente al Ing. Agr. Andrés Beretta, quien tuvo a cargo la ejecución de este trabajo en particular.

BIBLIOGRAFÍA

Aldous A; Craf C; Stevens C; Barry M and Bach L. 2007. Soil phosphorus release from a restoration wetland, Upper Klamath Lake, Oregon. *Wetlands*. 27(4): 1025 – 1035.

Carrasco M A, Opazo J A, Peralta I V y Vera L Q. 1992. Retención de fósforo en suelos de zonas semiáridas. *Agricultura Técnica*. 52(4): 411 – 415

Darilekab J, Sunab W, Huangab B, Wangab Z, Qiab Y and Weindorf D. 2011. Effect of Moisture Conditions in Rice Paddies on Phosphorus Fractionation in Agriculture Soils of Rapidly Developing Regions of China *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 42 (14): 1752-1764

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M y Robledo CW. 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Ferrando M, Mercado G y Hernández J. 2002. Dinámica del hierro y disponibilidad de fósforo durante períodos cortos de anaerobiosis en los suelos. *Agrociencia*. 1: 1-9

Gotoh, S and W H Jr Patrick. 1974. Transformations of iron in waterlogged soils as influenced by redox potential and pH. *Soil Science Society of American of American* 38: 66–71.

Hernández J. 2008. Métodos para estimar la disponibilidad de P en los suelos. En: Seminario de Actualización Técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Serie Técnica N° 172. Bermúdez R. y W. Ayala (Eds.). INIA, Uruguay. pp. 11-19.

Hernández J, Berger A, Deambrosi E y Lavecchia A. 2013. Soil Phosphorus Tests for Flooded Rice Grown in Contrasting Soils and Cropping History. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 44(7): 1193-1210

Kilmer V. 1960. The estimation of free iron oxides in soils. *Soil Science Society of America Proceeding*. 24:420-421

Kulhánek M, Balík J, Černý J and Vaněk V. 2009. Evaluation of phosphorus mobility in soil using different extraction methods. *Plant Soil and Environment*. 55(7): 267–272.

Obour A, Silveira M, Vendramini J, Sollenberger L and O'Connor G. 2011. Fluctuating water table effect on phosphorus release and availability from a Florida Spodosol. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 91 (2): 207-217

Patrick W H and Khalid R A. 1974. Phosphate release and sorption by soils and sediments: Effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science*. 186:53-55.

Picone L. I y Zamuner E. 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. En línea: [http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/067DE38143257A7B03256CB000485093/\\$file/nota3.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/067DE38143257A7B03256CB000485093/$file/nota3.pdf) Verificado: 29 /3 / 2012

Ponnamperuma F N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24:29-96.

Sah R N, Mikkelsen D S and Hafez A A. 1989. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption. *Soil Science Society of America Journal*. 53: 1723 – 1729

Snyder C and Slaton N. 2002. Effects of soil flooding and drying on phosphorus reactions. *News and Views Newsletter*. Potash and Phosphate Institute. Atlanta, Georgia. 4: 1-3

Tian J, Liu L, Dings H S and Chen T. 2008. Mobilization and transformation of phosphorus from water-soil interface of flooded soil. *China Environmental Science*. 29(7):1818-1823. SUMMARY

Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54:464-465.

Wraith JM, Or D. 1998. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education* 27, 13-19.

Wright, A.F. and J.S. Bailey. 2001. Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32: 3243-3258.

6. Efecto del agregado de azufre en la productividad de pasturas de trébol blanco

Cuadro, R.¹; Quincke, A.²; Giorello, D.¹; Bermudez, R.³

INTRODUCCIÓN

En Uruguay, el trébol blanco (*Trifolium repens*) es uno de los principales componentes en la mayoría de las pasturas mejoradas (Morón, 2008). Uno de los principales elementos de manejo de las pasturas mejoradas para aumentar su productividad y persistencia es la aplicación correcta de un programa de fertilización acorde a los requerimientos de la misma, y a la capacidad de suministro del suelo. En Uruguay, la atención en cuanto a la regulación de la fertilidad de pasturas está dirigida principalmente a los macronutrientes: nitrógeno (N) y fósforo (P); Morón, (1996). En los últimos años, en situaciones particulares de siembra de pasturas, el potasio (K) ha comenzado a ser considerado en las políticas de corrección de la fertilidad de suelos.

Surge la interrogante, si en situaciones de mayor intensificación productiva, que demandan una mayor producción de materia seca, y por lo tanto una mayor extracción de nutrientes de las reservas del suelo, otros nutrientes no podrían estar limitando los rendimientos de las pasturas (Zamalvide, 1995). Los requerimientos de S, aún en los suelos más pobres (bajo contenido de materia orgánica), son cubiertos en la medida de que la fertilización fosfatada de las pasturas se realice con superfosfato común, el cual contiene 21-23% de P_2O_5 y 12% de S. Sanders *et al.* (1993) mencionan que en Estados Unidos el uso cada vez más extendido de supertriple (0-46-0) en la fertilización de pasturas, que no presenta sulfato de calcio, así como el uso de mezclas físicas de supertriple y urea, y de fosfatos de amonio que no aportan S, podrían conducir a situaciones puntuales donde el S sea un nutriente limitante para el crecimiento vegetal.

Azufre en los suelos

La mayoría del S en los suelos (hasta 95%) se encuentra en forma orgánica (Nguyen y Goh, 1994; Morón, 1996; Scherer 2001), por lo que su cantidad está fuertemente ligada a las cantidades de carbono y N (Stevenson, 1986). En fracciones inorgánicas el S se encuentra como sulfato (SO_4), pero en algunos suelos calcáreos del país la presencia en forma de yeso ($CaSO_4$) puede llegar a ser importante (Morón, 1996). El SO_4^{2-} es móvil en el suelo y puede ser lixiviado fuera de la zona de raíces en algunos suelos en condiciones de lluvia intensa. Pero cuando un suelo comienza a secarse, el SO_4^{2-} puede moverse hacia la superficie del mismo a medida que se evapora el agua. Debido a esta movilidad del S, un análisis de suelo puede no dar información confiable en cuanto a la capacidad de suministro de S del suelo. Las pérdidas por lixiviación como SO_4^{2-} son más altas en suelos más livianos, comparados con suelos con mayor contenido de arcilla, debido a una menor capacidad de retención del SO_4^{2-} y a una mayor velocidad de penetración del agua en el perfil del suelo (Scherer, 2001). La lixiviación del S puede ser tan importante durante los meses de invierno, que incluso podrían estar limitando el crecimiento de las plantas en la primavera siguiente, aún cuando se hayan realizado fertilizaciones con azufre en el otoño anterior (Nguyen *et al.*, 1989).

La mineralización de S orgánico durante la estación de crecimiento es también una fuente potencial de S para las plantas. Finalmente, las deposiciones atmosféricas pueden llegar a ser una vía de entrada importante de S al suelo. Según Stevenson

¹ Ing. Agr., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Tacuarembó.

² Ing. Agr. PhD., Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA La Estanzuela.

³ Ing. Agr. MPhil., hasta 2015 Programa Nacional de Investigación en Pasturas y Forrajes. INIA Treinta y Tres.

(1986) citado por Morón (1996), en regiones con altos niveles de industrialización, estas entradas de S pueden llegar a los 200 kg S/ha/año, mientras que en áreas rurales fuera de la influencia industrial los valores son de 5 kg S/ha/año.

Respuesta a la fertilización con azufre

El trébol blanco (TB) es sensible a la fertilización con S en suelos deficitarios de Nueva Zelanda y Francia (Scherer, 2001; Tallec *et al.*, 2008). En estos países se ha demostrado que cambios en el contenido de S de los suelos provocan aumentos en la contribución del TB en las mezclas forrajeras (Jones, 1974; Scherer y Lange, 1996; Tallec *et al.*, 2008). Mc Naught *et al.* (1960), demostraron en varios ensayos en Nueva Zelanda desde 1952, que sobre pasturas de leguminosas, muchas de las respuestas a la fertilización con superfosfato atribuidas al P, eran en realidad debido a la componente de S. La respuesta a la fertilización con S es más probable que ocurra en sistemas extractivos que retiran gran parte de la biomasa de los cultivos dejando escasos residuos frescos degradables, así como cuando las condiciones físicas del suelo son malas (pobre aireación compactación, exceso hídrico) y por tanto existen limitantes para el crecimiento de las raíces (García, 2008). Son esperables mayores problemas de deficiencia de este nutriente en chacras viejas que entran en una fase de pasturas y donde ocurren ganancias netas de materia orgánica en el suelo, como en praderas viejas donde la mineralización de materia orgánica es muy reducida, y quizás también en sistemas que cambian de laboreos convencionales a siembra directa, donde también se producen ganancias netas de materia orgánica (Bordoli, 2014). Relevamientos nutricionales exploratorios de pasturas (Zamalvide, 1995) y algunos ensayos de fertilización con S realizados por la Cátedra de Fertilidad de Suelos de Facultad de Agronomía, Uruguay (Cerveñasky, 1997) no han sido concluyentes en cuanto a una clara respuesta en producción de forraje, pero las inconsistencias sí demuestran que

es un tema que tiene que seguir siendo estudiado (Bordoli, 2014). Los requerimientos de S difieren entre especies y a su vez entre las diferentes etapas de desarrollo de las mismas (Scherer y Lange, 1996).

Spencer y Glendinning (1980), determinaron para una gran variedad de suelos en Nueva Gales del Sur (Australia), que para llegar al 90% de rendimiento de una pastura de trébol subterráneo es necesario la combinación de la fertilización fosfatada más el agregado de S, aunque el principal nutriente limitante era el P. En Nueva Zelanda, sobre pasturas de trébol blanco de alta producción de materia seca, la ausencia de fertilización con P y S puede llegar a marcar síntomas de deficiencias de dichos nutrientes a nivel foliar. A su vez, no sólo es importante la fertilización individual de cada nutriente, sino también mantener un adecuado balance entre P y S, lo que permite una mayor eficiencia de uso de los nutrientes aplicados (Sinclair *et al.*, 1996). La variación estacional es, obviamente, un factor que podría modificar las correlaciones entre los valores del análisis del suelo y la respuesta de las plantas (Probert y Jones, 1977). Sinclair *et al.* (1985), sugieren que la relación en el contenido foliar entre S y P en pasturas, puede ser un adecuado parámetro para evaluar la necesidad de fertilización.

Determinaciones de azufre en planta y suelo

El análisis de tejidos vegetales (hoja + pecíolo) da una mejor idea de las necesidades S por parte de las plantas (Sanders *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 1999). El nivel crítico de S en planta para trébol blanco es en promedio 0.26%, con un rango de 0.25 a 0.28% en prefloración (McNaught *et al.*, 1960; Andrew, 1977; Reuter y Robinson, 1997; Morón, 2008), aunque es esperable que existan diferentes valores críticos de S en planta según la etapa de la pastura que se esté considerando (Haneklaus y Schnug, 1994; Scherer y Lange, 1996; Zhao *et al.*, 1999). Esto se debe a que los requerimientos de nutrientes están más estrechamente relacionados con la tasa de crecimiento que con la producción

de materia seca en el momento de la medición, y la tasa de crecimiento varía según las diferentes etapas de crecimiento de la pastura (Scaife y Burns. 1986). Por lo expresado anteriormente, el muestreo debe realizarse según pautas que sean comparables para cada cultivo o pastura. En este sentido, Jones y Case (1990) propusieron el inicio de floración (10% de floración) y la evaluación de la parte aérea, como las más apropiadas para evaluar la concentración de la mayoría de los nutrientes en pasturas.

Las determinaciones de S en el suelo han sido muy dificultosas debido a las diferentes formas que se encuentra presente en el suelo (Morón, 1996). Sin embargo, el análisis del suelo podría ser uno de los criterios potencialmente útil para estimar dichos contenidos, aunque hasta el momento no se han establecido las relaciones necesarias entre el contenido de S del suelo, determinado químicamente, y las respuestas de las leguminosas a la aplicación de fertilizantes azufrados (Barbazan *et al.*, 2007). Diferentes ensayos han demostrado que la estimación del contenido de S, medido a través del análisis de suelo tiene un bajo poder de predicción de la respuesta a la fertilización con S en situaciones de laboreo (Zhao *et al.*, 1999). Investigaciones realizadas por Briner *et al.* 1974; citado por Probert y Jones, 1977 reportan un valor crítico para la producción de pasturas de 5.4 mg S-SO₄⁻²/kg de S en el horizonte de suelo más superficial. Tomando como referencia la información generada

a nivel nacional e internacional, así como también el contexto donde muchos de los actuales sistemas de producción agropecuaria están inmersos (rotación cultivos-pasturas), cada vez es más necesaria una mayor productividad y persistencia de las pasturas, basado en una fertilización balanceada, por lo que es necesario explorar las necesidades de otros nutrientes como el S.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo fue el estudio de la respuesta del agregado de S en pasturas de TB sobre la producción de forraje en diferentes suelos del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se instalaron en otoño del 2008, en los 14 sitios de la red de fertilización (ver Capítulo 1). A excepción del sitio de Ombúes y Palmitas, en todos los sitios experimentales se partió de campo natural sin historia previa de fertilización. La siembra se realizó al voleo, sobre suelos previamente tratados con glifosato. Se sembraron 5 kg/ha de semilla de TB 'Estanzuela Zapicán' y cuando fue necesario se efectuó una resiembra con 4 kg/ha para asegurar una buena población. La evaluación de forraje se extendió por cuatro años. Se trabajó en un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones y tres tratamientos de S que se detallan en el Cuadro 6.1. La aplicación del sulfato de calcio se realizó al voleo al momento de la siembra.

Cuadro 6.1. Dosis anuales de S como Sulfato de Calcio

Tratamiento	Fuente	kg S-SO ₄ Ca / ha /año
1	Testigo	0
2	Sulfato de calcio	10
3	Sulfato de calcio	25

En el otoño del primer año se aplicaron a la siembra 120 kg P_2O_5 /ha como superfosfato triple al voleo a todos los tratamientos y las refertilizaciones a partir del segundo año fueron con 30 kg P_2O_5 /ha de superfosfato triple.

Muestreos de suelo: Al inicio del experimento se efectuó un muestreo compuesto de cada bloque, a una profundidad de 0-7.5 cm y 7.5-15. A partir del segundo año, y en los sucesivos, se realizó el análisis de suelo individual de cada parcela. En los mismos se determinó concentración de P extractable a través de los métodos de Bray I, ácido cítrico y resinas catiónicas (descritos en los capítulos 1 y 2) y concentración de sulfatos a través de la técnica de Cantarella y Prochnow (2001).

Producción de forraje: La producción de forraje se evaluó con corte con máquina, cuando el trébol blanco alcanzaba una altura entre 15-20 cm. Previo al corte, se determinó mediante estimación visual el porcentaje

de TB en cada parcela y se tomaron muestras para determinar el contenido de materia seca.

Contenido S en planta: En los cortes realizados durante el otoño, invierno y primavera hasta la floración se tomaron muestras de planta (hoja + pecíolo) para determinaciones analíticas de S.

El análisis estadístico de los registros de producción de forraje, contenido de S en planta y en suelo, obtenidos durante el período experimental de cuatro años, se realizó mediante análisis de varianza utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 6.2 se presenta para cada sitio la producción de materia seca promedio anual de TB, según los diferentes niveles de S aplicados anualmente.

Cuadro 6.2. Producción de forraje (kg MS/ha) de TB, promedio anual de los tratamientos de fertilización con azufre (kg S/ ha /año) aplicado como sulfato de calcio.

Zona	Tratamiento	Glencoe ⁽³⁾	Tambores ⁽³⁾	
Norte	T	3750	3298	
	10	3593	3283	
	25	3753	3488	
		ns	ns	
Noreste	Tratamiento	Tres Puentes ⁽³⁾	Sauce Cañote ⁽⁴⁾	
	T	2178	3659	
	10	2412	3583	
	25	2340	3319	
		ns	ns	
Este	Tratamiento	Palo a Pique ⁽³⁾	Rincón de Ramírez ⁽⁴⁾	Isla Patrulla ⁽¹⁾
	T	2536	2432	1226
	10	3303	2647	1794
	25	2230	2646	1121
		ns	ns	ns
Centro-sur	Tratamiento	Florida ⁽⁴⁾	La Carolina ⁽²⁾	Pan de Azúcar ⁽⁴⁾
	T	4003	3802	1355
	10	3748	4057	1243
	25	3856	5437	1410
		ns	ns	ns
Litoral	Tratamiento	Ombúes ⁽³⁾	Palmitas ⁽³⁾	Young ⁽³⁾
	T	6298	7948	6409
	10	6541	8684	6525
	25	7116	8720	6425
		ns	ns	ns

T: Testigo; ns: no significativo.

⁽¹⁾ Corresponde a la producción del primer año; ⁽²⁾ promedio de dos años de producción; ⁽³⁾ promedio de tres años de producción; ⁽⁴⁾ promedio de cuatro años de producción.

La diferencia en los años de evaluación de la pastura entre los diferentes sitios, se debió a que la pastura no tuvo la misma persistencia en todos los sitios, o en algunos de ellos la implantación en el primer año fue muy baja (menor al 5% de cobertura).

Para el total de los sitios, no se observaron respuestas significativas ($p < 0,05$) a la fertilización con S en la producción de forraje promedio anual de trébol blanco, para los

niveles de fertilización con S estudiados. Ayala *et al.* (2008), reportaron similares resultados en la región Este comparando dos fuentes de S (S elemental y yeso) con niveles de fertilización fosfatada constante (80 kg P_2O_5 /ha). Analizando la información de producción de forraje anual, solamente los sitios de Ombúes (2^{do} y 3^{er} año) y Young (4^{to} año) presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en respuesta al agregado de S (Figura 6.1).

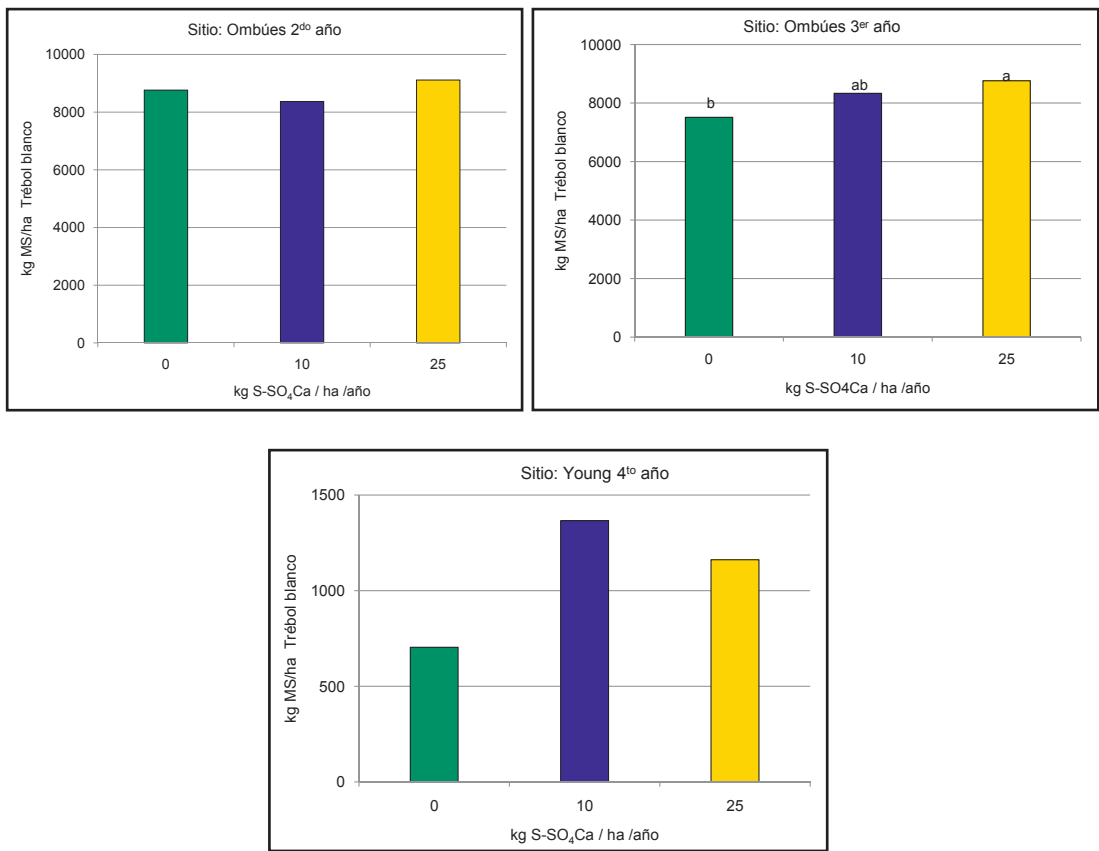


Figura 6.1. Producción de materia seca (kg/ha de Trébol blanco) total anual según tratamiento de fertilización con sulfato de calcio (kg S-SO₄Ca / ha /año) para los sitios de Ombúes (3^{er} y 4^{to} año) y Young (4^{to} año).

En relación a la concentración de S en planta (Figura 6.2), no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos de fertilización aplicados en ninguno de los sitios evaluados. A pesar de los niveles de fertilización aplicados, el promedio de con-

centración de S en planta en todos los sitios estuvo por debajo del nivel crítico reportado para trébol blanco (McNaught *et al.*, 1960; Andrew, 1977; Reuter y Robinson, 1998). Los valores de S en planta encontrados son, en general, menores a los reportados

por Morón (2008); quien realizando estudios sobre chacras de TB en el este del país, sobre las cuales en la mayoría de ellas no se fertiliza con fuentes fosfatadas portadoras de S, encontró que un 30% de las mismas también presentaban valores de S en planta por debajo del nivel crítico. Se observa un rango de variación importante en las concen-

traciones de S en planta obtenidos entre los diferentes sitios, en cada tratamiento. El sitio ubicado en Sauce Cañote fue el que en promedio presentó el mayor contenido de S en planta (2.41 mg/g); a su vez los sitios ubicados en Rincón de Ramírez y Florida fueron los que tuvieron menor concentración (1.91 y 1.78 g/mg, respectivamente).

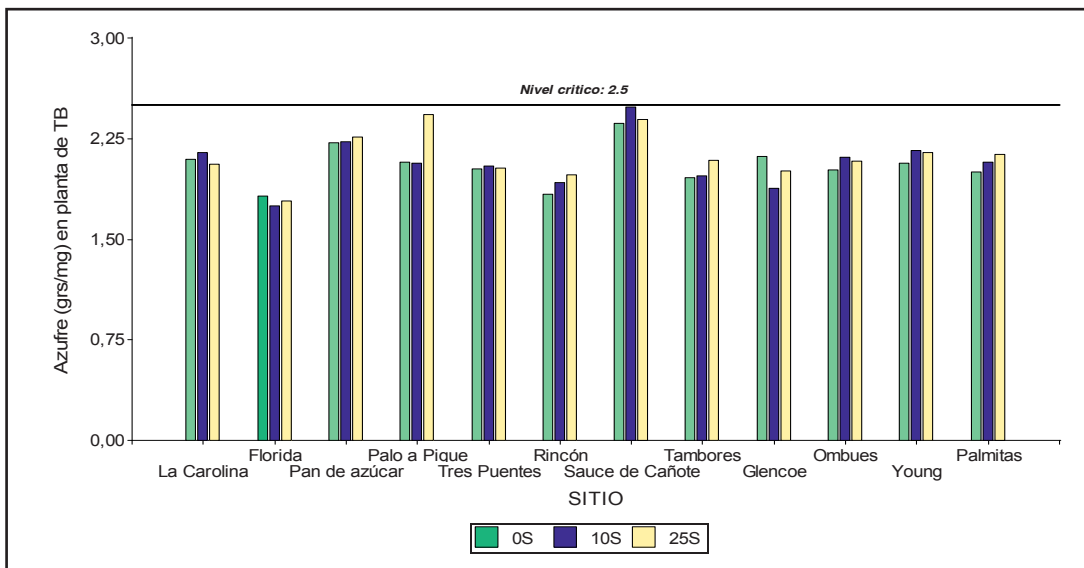


Figura 6.2. Contenido de azufre (mg/g) en planta (hoja + pecíolo) de trébol blanco, previo a la floración, según tratamientos de fertilización con sulfato de calcio.

Las estimaciones del contenido de S en los suelos, promedio de todos los tratamientos a una profundidad de 7.5 cm, fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sitios. Si tomamos como valor crítico $5.4 \text{ mg S-SO}_4^{-2} / \text{kg}$ (Probert y Jones, 1977), solamente los suelos de los sitios de Palmitas, Ombúes y Young, presentarían niveles bajos (por debajo de dicho nivel) en su condición natural sin agregado de S. El promedio de S en el suelo entre tratamientos no presentó diferencias significativas en la mayoría de los sitios evaluados, a excepción del sitio de Florida, donde hubo un aumento significativo ($p < 0.05$) en el contenido de S en el suelo cuando se agregaron 25 kg S/ha , con respecto al testigo y al agregado de 10 kg S/ha (Cuadro 6.3). Tenemos que tener en cuenta que al efectuar el muestreo a una profundidad de 7.5 cm podemos estar subestimando el contenido de S

del suelo, debido a que puede existir un movimiento del S hacia mayores profundidades. Por ejemplo, en el caso de Palmitas, que tuvo una alta producción de forraje pero sin respuesta al agregado de S, es posible que haya ocurrido un lavado de S desde la superficie hacia capas más profundas, y que el cultivo haya logrado utilizar ese S acumulado subsuperficialmente. Si analizamos la información anual, solamente los sitios de Florida e Isla Patrulla para los años 2 y 3 presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, presentando mayores valores de S en el suelo con la mayor dosis de fertilizante (25 kg S/ha/año) con respecto a tratamiento testigo (sin S). Los sitios ubicados sobre el litoral del país y La Carolina, fueron los de menor contenido promedio anual de S en el suelo, mostrando a su vez una tendencia de respuesta a la fertilización con azufre.

Cuadro 6.3. Contenido de azufre (promedio 4 años) en el suelo (mg S-SO₄/kg), según sitios y tratamientos de fertilización con S (kg S/ ha) aplicado como sulfato de calcio.

Zona	Tratamiento	Glencoe	Tambores	
Norte	T	12.5	11.3	
	10	13.9	11.7	
	25	14.3	11.7	
	Promedio †	13.5 bc	11.6 d	
	††	ns	ns	
Noreste	Tratamiento	Tres Puentes	Sauce Cañote	
	T	9.3	15.8	
	10	9.8	15.2	
	25	9.8	15.1	
	Promedio †	9.6 e	15.4 a	
	††	ns	ns	
Este	Tratamiento	Palo a Pique	Rincón de Ramírez	Isla Patrulla
	T	14.0	7.6	11.6
	10	15.7	8.0	12.4
	25	14.6	8.2	13.6
	Promedio	14.8 ab	7.9 f	12.5 cd
		ns ††	ns	ns
Centro-sur	Tratamiento	Florida	La Carolina	Pan de Azúcar
	T	9.9 b	5.6	10.8
	10	10.4 b	5.6	11.5
	25	13.2 a	6.2	12.1
	Promedio	11.2 de	5.8 gh	11.5 d
		*	ns	ns
Litoral	Tratamiento	Ombúes	Palmitas	Young
	T	5.1	4.3	4.4
	10	5.1	4.1	4.9
	25	7.5	4.2	4.8
	Promedio	5.9 g	4.2 h	4.7 gh
		ns	ns	ns

† Letras distintas indican diferencias significativas entre sitios (LSD 0.05); †† Letras distintas dentro de un sitio indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD 0.05); ns: no significativo.

Si bien los análisis de S en planta estuvieron consistentemente por debajo de los niveles críticos, en la mayoría de las situaciones, a excepción de los sitios del litoral sur y centro del país, los valores de S en el suelo estuvieron por encima del nivel crítico manejado. En tal sentido, la escasa magnitud de la respuesta al S pudo estar más relacionada a los atributos de suelo, relación con otros nutrientes y clima que a la misma fertilización azufrada (Probert y Jones, 1977). Por ejemplo, la historia de baja extracción de S asociado a la baja intensidad de uso de los sitios seleccionados para el estudio. También se considera que la dosis de P utilizada puede haber resultado escasa, en virtud de las respuestas a P observadas en el estudio y discutidas en los capítulos anteriores. Es necesario continuar la investigación de la fertilización con S, manejando niveles más altos de otros nutrientes en el suelo, sobre todo el P.

CONCLUSIONES

- La producción de forraje de trébol blanco fue muy variable entre años y entre sitios. Para los diferentes niveles de productividad de materia seca obtenidos en todos

los sitios de la red, no se encontraron respuestas significativas en el promedio anual, así como tampoco en la producción acumulada, para los diferentes niveles de fertilización con S evaluados.

- Para los diferentes años analizados, solamente el sitio de Ombúes en su 2^{do} y 3^{er} año de producción y Young en su 4^{to} año, presentaron diferencias significativas entre tratamientos.
- Las concentraciones de S en planta de trébol blanco (hoja + pecíolo) en promedio, para todos los tratamientos, estuvieron por debajo del nivel crítico mencionado para la especie en la bibliografía, y no se logró un aumento significativo a través de la fertilización con azufre.
- En la mayoría de los sitios la aplicación de 10 ó 25 kg de S-SO₄Ca/ha/año, no aumentó significativamente la concentración de sulfatos en el suelo en los primeros 7.5 cm. Solamente el suelo ubicado en el sitio de Florida, presentó un mayor contenido de S-SO₄ cuando fue fertilizado con 25 kg S/ha/año, con respecto al tratamiento testigo y al fertilizado con 10 kg S/ha/año. Los contenidos de S en suelo, fueron diferentes entre los sitios evaluados.

BIBLIOGRAFÍA

- AYALA, W.; BERMÚDEZ, R.; MORÓN, A.** 2008. Efecto del fósforo y azufre en mejoramientos de trébol blanco. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 96-99. (Serie Técnica; 172)
- ANDREW, C.S.** 1977. The effect of sulphur on the growth, sulphur and nitrogen concentrations, and critical sulphur concentrations of some tropical and temperate pasture legumes. *Australian Journal of Agricultural Research* 28: 807-820.
- BARBAZÁN M.; FERRANDO M.; ZAMALVIDE, J.** 2007. Estado nutricional del *Lotus corniculatus* en Uruguay. *Agrociencia*, 11(1): 22 - 34.
- BORDOLI, J.** 2014. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. [En línea]. Montevideo: Facultad de Agronomía, UDELAR. Consultado 20 set.2015. Disponible en <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/PASTURAS%20CRS/12%20-%20Fertilizacion%20de%20Pasturas.pdf>.
- CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L.I.** 2001. Determinação de sulfato em solos. En: Raij, B. van; Anadrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (eds.). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. p. 225-230.
- CERVEÑASKY, A.** 1997. Azufre: Manejo de la fertilidad en producciones extensivas. [Presentación oral]. En: Curso de actualización para egresados. Mercedes
- DI RIENZO J.; CASANOVES F.; BALZARINI M.; GONZALEZ L.; TABLADA M.; ROBLEDÓ, C.** 2013. InfoStat Software estadístico, versión 2013. [En línea]. Córdoba: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultado 17 mar.2016. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>.
- GARCÍA, A.** 2008. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo. En: Jornada de cultivos de invierno, INIA La Estanzuela. p. 17-19. Montevideo: INIA. (Serie Actividades de Difusión; 531).
- HANEKLAUS, E.; SCHNUG, E.** 1994. Diagnosis of crop sulphur status and application of X-ray fluorescence spectroscopy for the sulphur determination in plant and soil materials. *Sulphur Agriculture*, 18: 31-40.
- JONES, M.** 1974. Fertilization of annual grasslands of California and Oregon. En: Mays, D.A. (ed.). Forage fertilization. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy. p. 255-275.
- JONES, J.; CASE, V.** 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. En: Westerman, R.L. Soil testing and plant analysis. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America. p. 389-427.
- MCNAUGHT, K.; PIETERNELLA, J.; CHRISSTOFFELS, J.** 1960. Effect of sulphur deficiency on sulphur and nitrogen levels in pastures and Lucerne. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 4(1):177-196.
- MORÓN, A.** 1996. Azufre: consideraciones sobre su situación en Uruguay. En: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. (Eds), Manejo y fertilidad de suelos, INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. p. 73-79. (Serie Técnica; 76).
- MORÓN, A.** 2008. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En: Bermúdez, R.; Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. p. 17-29. (Serie Técnica; 172)
- NGUYEN, M.; TILLMAN, R.; GREGG, P.** 1989. Evaluation of sulphur status of East Coast pastures of the North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 32: 273-280.

- NGUYEN, M.L.; GOH, K.M.** 1994. Sulphur cycling and its implications on sulphur fertilizer requirements of grazed grassland ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 49:173-206.
- REUTER, D.; ROBINSON, J.** 1997. Plant analysis: an interpretation manual. CISIRO Publishing. 536 p.
- SANDERS, J.; PHILLIPS, J.; REHCIGL, E.; EICHHORN, M.** 1993. Sulfur: The Missing Link for Warm Season Grasses. [En línea]. Consultado 7 oct.2014. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/2CFCD9FA13AAF76185257D3200572F5C/\\$FILE/%20BC-1993-1%20p28.pdf](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/2CFCD9FA13AAF76185257D3200572F5C/$FILE/%20BC-1993-1%20p28.pdf)
- SCAIFE, A.; BURNS, I.** 1986. The sulphate-S/total S ratio in plants as an index of their sulphur status. *Plant and Soil*, 91:61-71.
- SCHERER, H.; LANGE, A.** 1996. N₂ fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. *Biology and Fertility of Soils*, 23(4):449-453.
- SCHERER, H.** 2001. Sulphur in crop production.-invited paper. *European Journal of Agronomy*, 23:81-111.
- SINCLAIR, A.; BOSWELL, C.; CORNFORTH, I.; LEE, A.; MORGAN, C.; MORTON, J.; NGUYEN, M.; SAUNDERS, W.; SHANNON, P.** 1985. Agronomic requirements for sulphur in New Zealand pastures. *Proceedings of the 20th Technical Conference of the New Zealand Fertilizer Manufacturers research Association*, 2:538-572.
- SINCLAIR, A.; MORRISON, J.; SMITH, L.; DODDS, K.** 1996. Effects and interactions of phosphorus and sulphur on a mown white clover/ryegrass sward. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 39:435-445.
- SPENCER, K.; GLENDINNING, J.** 1980. Critical soil test values for predicting the phosphorus and sulfur status of subhumid temperate pastures. *Australian Journal of Soil Research*, 18:435-445.
- STEVENSON, F.J.** 1986. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur. micronutrients. New York: Wiley. 380 p.
- TALLEC, T.; DIQUE´ LOU, S.; LEMAUVIEL, S.; CLIQUET, J.B.; LESUFFLEUR, F.; OURRY, A.** 2008. Nitrogen: sulphur ratio alters competition between *Trifolium repens* and *Lolium perenne* under cutting: production and competitive abilities. *European Journal Agronomic*, 29:94-101.
- ZAMALVIDE, J.** 1995. Deficiencias de azufre en suelos del Uruguay. *Revista Plan Agropecuario*, 67:31-35.
- ZHAO, F.; HAWKESFORD, M.; MCGRATH, S.** 1999. Sulphur Assimilation and Effects on Yield and Quality of Wheat. *Journal of Cereal Science*, 30:1-17.

INIA Dirección Nacional

Andes 1365, P. 12

Montevideo

Tel. 598 2902 0550

Fax 598 2902 3633

iniadn@dn.inia.org.uy

INIA La Estanzuela

Ruta 50, Km 11

Colonia

Tel. 598 4574 8000

Fax 598 4522 4061

iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas

Ruta 48, Km 10

Canelones

Tel. 598 2367 7641

Fax 598 2367 7609

inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande

Camino al Terrible

Salto

Tel. 598 4733 5156

Fax 598 4732 9624

inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó

Ruta 5, Km 386

Tacuarembó

Tel. 598 4632 2407

Fax 598 4632 3969

iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres

Ruta 8, Km 281

Treinta y Tres

Tel. 598 4452 2305

Fax 598 4452 5701

iniatt@tyt.inia.org.uy

www.inia.uy