

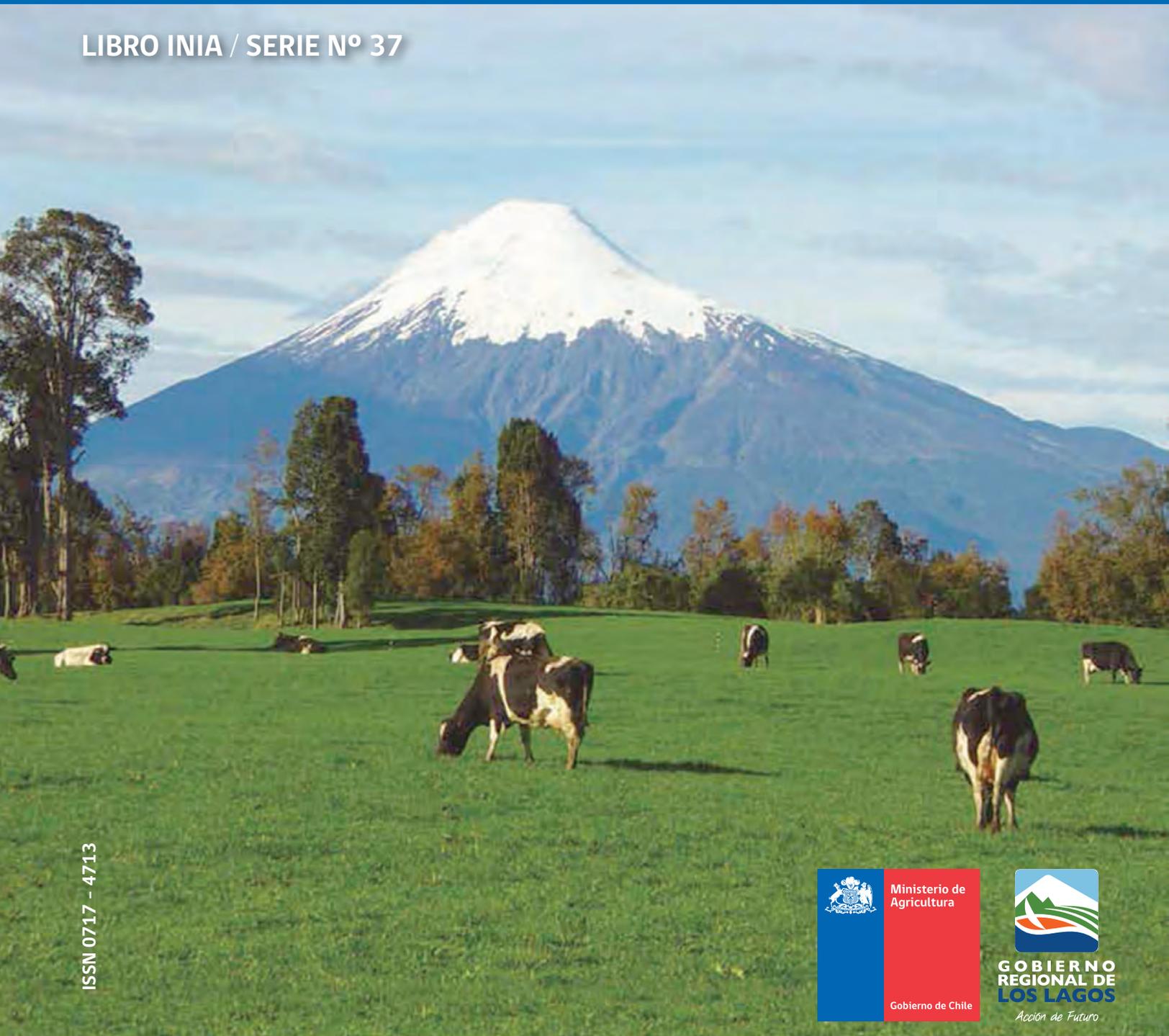


Fertilización Fosfatada de Praderas en Suelos Trumaos de la Región de Los Lagos

Autores / Erika Vistoso Gacitúa, Patricio Sandaña Gómez, Sergio Iraira Higuera.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

LIBRO INIA / SERIE N° 37



ISSN 0717 - 4713





Fertilización Fosfatada de Praderas en Suelos Trumaos de la Región de Los Lagos

Autores / Erika Vistoso Gacitúa, Patricio Sandaña Gómez, Sergio Iraira Higuera.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

LIBRO INIA / SERIE N° 37





FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE PRADERAS EN SUELOS TRUMAOS DE LA REGIÓN DE LOS LAGOS

Editores:

Erika Vistoso Gacitúa

Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs., INIA Remehue, Osorno. E-mail: evistoso@inia.cl

Patricio Sandaña Gómez

Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs., INIA Remehue, Osorno. E-mail: patricio.sandana@inia.cl

Sergio Iraira Higuera

Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs., INIA Remehue, Osorno. E. mail: siraira@inia.cl

Director Responsable:

Rodrigo De La Barra Ahumada

Director Regional INIA - Remehue

Cita Bibliográfica correcta:

Vistoso G., Erika; Sandaña P.; Iraira, S. 2017. Fertilización fosfatada de praderas en suelos Trumaos de la Región de Los Lagos. 124 p. Colección de Libros INIA N° 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno, Chile.

© 2017. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA.

INIA Remehue. Ruta 5 Sur, km. 8 norte de Osorno, Región de Los Lagos. Teléfono (56-64) 2334800. Casilla 24-O, Osorno, Chile.

Autoriza sólo la reproducción parcial citando la fuente y/o autores.

Publicado con autorización de la Secretaria Regional Ministerial de Agricultura de la Región de Los Lagos.

Fotografías:

INIA

Diseño y Diagramación:

Ricardo Del Río González, ricardodelrio71@gmail.com

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	9
AGRADECIMIENTOS	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1	
SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS	15
1.1 Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas	16
1.2 Principales limitaciones de fertilidad de los suelos derivados cenizas volcánicas	17
CAPÍTULO 2	
EL FÓSFORO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS	19
2.1 Funciones del fósforo en la planta	20
2.2 Transformaciones del fósforo en los suelos derivados de cenizas volcánicas	21
2.3 Absorción de fósforo por las plantas	23
CAPÍTULO 3	
MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS SUELOS PARA SUMINISTRAR FÓSFORO A LAS PLANTAS	27
CAPÍTULO 4	
EFFECTO DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS SOBRE EL RENDIMIENTO ACUMULADO Y FÓSFORO DISPONIBLE EN EL SUELO	31
CAPÍTULO 5	
FERTILIZANTES FOSFATADOS	39
5.1 Evaluación de la solubilidad y composición química de fertilizantes fosfatados	44
5.1.1 Materiales y métodos	44
5.1.2 Resultados	46

CAPÍTULO 6

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MANTENCIÓN EN UNA PRADERA PERMANENTE

	51
6.1 Evaluación de la fertilización fosfatada de mantención en una pradera permanente	52
6.1.1 Materiales y métodos	52
6.1.2 Manejos del ensayo de campo	53
6.1.3 Análisis	53
6.1.4 Resultados	54
6.1.4.1 Caracterización climática de la localidad de Remehue durante el período experimental 2013-2015	54
6.1.4.2 Caracterización de las propiedades químicas del sitio experimental en Remehue	55
6.1.4.3 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera permanente	57
6.1.4.4 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en la concentración foliar de fósforo	61
6.1.4.5 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en la calidad nutritiva de la pradera permanente	62
6.1.4.6 Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en la pradera permanente	64
6.1.4.7 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en los parámetros del suelo de la pradera permanente	64

CAPÍTULO 7

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE ESTABLECIMIENTO EN UNA PRADERA DE BALLICA

	67
7.1 Evaluación de la fertilización fosfatada de establecimiento en una pradera de ballica	68
7.1.1 Materiales y métodos	68
7.1.2 Manejos del ensayo de campo	69
7.1.3 Análisis	69
7.1.4 Resultados	69
7.1.4.1 Caracterización climática de la localidad de Purranque durante el período experimental 2013-2015	69
7.1.4.2 Caracterización de las propiedades químicas del sitio experimental en Purranque	70
7.1.4.3 Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera de ballica	72
7.1.4.4 Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en la concentración foliar de fósforo	76

7.1.4.5	Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en la calidad mineral en una pradera de ballica	77
7.1.4.6	Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en una pradera de ballica	78
7.1.4.7	Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en los parámetros del suelo de la pradera de ballica	79

CAPÍTULO 8

EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE CORRECCIÓN EN UNA PRADERA NATURALIZADA

8.1	Evaluación de la fertilización fosfatada de corrección en una pradera naturalizada	82
8.1.1	Materiales y métodos	82
8.1.2	Manejos del ensayo de campo	83
8.1.3	Análisis	83
8.1.4	Resultados	83
8.1.4.1	Caracterización climática de la localidad de Fresia durante el período experimental 2013-2015	83
8.1.4.2	Caracterización de las propiedades químicas del sitio experimental en Fresia	85
8.1.4.3	Efecto de la fertilización fosfatada de corrección sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera naturalizada	86
8.1.4.4	Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en la concentración foliar de fósforo	89
8.1.4.5	Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en la calidad nutritiva de la pradera naturalizada	90
8.1.4.6	Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en la pradera naturalizada	92
8.1.4.7	Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en los parámetros del suelo de la pradera naturalizada	93

CAPÍTULO 9

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTE FOSFATADO EN PRADERAS

9.1	Evaluación económica de la fertilización fosfatada de mantención en una pradera permanente	96
9.2	Evaluación económica de la fertilización fosfatada de establecimiento en una pradera de ballica	98
9.3	Evaluación económica de la fertilización fosfatada de corrección en una pradera naturalizada	100
9.4	Impacto de la fuente de fósforo en la producción de materia seca y costos asociados	102

CAPÍTULO 10	
CONCLUSIONES	105
CAPÍTULO 11	
SUGERENCIAS	109
CAPÍTULO 12	
ESTRATEGIAS PARA ENFRENTAR LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO EN EL SUELO	111
LITERATURA CITADA	117

PRÓLOGO

Los sistemas productivos agropecuarios se ven enfrentados a una demanda constante de productos que son requeridos por la población nacional y que, a la vez, deben ser manejados en forma sostenible y amigable con el medio ambiente.

Es conocido por todos que nuestra superficie agrícola está dominada por suelos derivados de cenizas volcánicas que presentan características físicas, químicas y biológicas muy especiales. Además, la superficie cultivable representa un potencial limitado de expansión y, por ende, una disminución en su productividad ocasionaría un deterioro significativo al sector agropecuario del país.

El recurso suelo es primordial en el proceso productivo, parte importante de los esfuerzos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y sus Centro Regionales de Investigación, distribuidos a través de nuestro país, se encuentran orientados a desarrollar estudios de investigación que generen el conocimiento necesario para proporcionar un adecuado manejo agronómico.

Los sistemas productivos ganaderos de la Región de Los Lagos son esencialmente pastoriles, desarrollándose sobre suelos derivados de cenizas volcánicas que presentan una alta retención o fijación de fósforo, característica que influye en la rentabilidad de los cultivos y praderas. En este tipo de suelos volcánicos, la disponibilidad de fósforo afecta la producción, persistencia y calidad del forraje y, por ende, la producción de carne y leche. Razones por las cuales, el fósforo es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las praderas.

El presente libro incluye los resultados obtenidos dentro del Convenio de Cooperación "Desarrollo del Programa de Mejoramiento de la Capacidad Productiva de las Praderas, BIP 30125789-0", donde el fósforo constituye el objetivo de interés.

Erika Vistoso Gacitúa
Editor

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Gobierno Regional de la Región de Los Lagos y a la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura de la Región de Los Lagos, en forma especial, porque a través de su apoyo financiero fue posible la ejecución de esta investigación.

También, al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y al Centro Regional de Investigación Remehue (INIA Remehue) por el apoyo otorgado y la disponibilidad de las instalaciones ocupadas durante el desarrollo de esta investigación.

Durante la ejecución de este Convenio de Cooperación participaron los siguientes profesionales:

Gloria Sepúlveda Wolf, Químico.

Andrés Naguil Troncoso, Ingeniero Agrónomo.

Fernando Salazar Troncoso, Ingeniero de Ejecución en Agronomía.

Boris Nieto Martínez, Técnico Experto Agrario, Ingeniero de Ejecución en Agronomía.

En la planificación de los experimentos de laboratorio y campo y, en el análisis de datos participaron los siguientes investigadores de INIA Remehue y profesionales:

Sergio Iraira Higuera, Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs., INIA Remehue.

Patricio Sandaña Gómez, Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs., INIA Remehue.

Erika Vistoso Gacitúa, Ingeniero Agrónomo, Dr. Cs., INIA Remehue.

Mónica Antilén Lizana, Químico, Dr. en Química, Departamento de Química Inorgánica, Facultad de Química, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Además, se contó la participación de la Sra. Angélica Sadzawka Rebolledo, Químico Farmacéutico, en la revisión del texto de las secciones de implementación y validación de metodologías y su evaluación en fertilizantes fosfatados y suelos.

Nuestros agradecimientos a la colaboración de los Sres. Norman Chien, Ph.D., USA, y Surinder Saggat, Ph.D., Professor, Landcare Research, Nueva Zelanda, quienes generosamente aportaron su conocimiento y los protocolos oficiales de análisis de solubilidad de fertilizantes fosfatados y la metodología de la resina de intercambio iónico, respectivamente.

Finalmente, al agricultor Sr. Sergio Mödinger Gebauer, propietario del Predio "El Ñadi", ubicado en la localidad de Fresia, Provincia de Llanquihue, quién facilitó uno de los sitios experimentales donde se estableció el ensayo de campo de fertilización fosfatada de corrección.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y crecimiento vegetal requiere de recursos ambientales tales como: luz solar, dióxido de carbono (CO₂), agua y nutrientes esenciales, los cuales deben estar disponibles en cantidades necesarias que maximicen la producción de cultivos y praderas. Los nutrientes esenciales (Cuadro 1) son requeridos en diferentes concentraciones agrupándose en macronutrientes y micronutrientes.

Cuadro 1. Niveles adecuados de nutrientes esenciales requeridos por las plantas.

Elemento	Símbolo químico	Concentración en materia seca *	Nº relativo de átomos respecto al molibdeno
Obtenidos del agua y dióxido de carbono			
Hidrógeno	H	6	60.000.000
Carbono	C	45	40.000.000
Oxígeno	O	45	30.000.000
Obtenidos del suelo			
Macronutrientes			
Nitrógeno	N	1,5	1.000.000
Potasio	K	1,0	250.000
Calcio	Ca	0,5	125.000
Magnesio	Mg	0,2	80.000
Fósforo	P	0,2	60.000
Azufre	S	0,1	30.000
Silicio	Si	0,1	30.000
Micronutrientes			
Cloro	Cl	100	3.000
Hierro	Fe	100	2.000
Boro	B	20	2.000
Manganeso	Mg	50	1.000
Sodio	Na	10	400
Zinc	Zn	20	300
Cobre	Cu	6	100
Níquel	Ni	0,1	2
Molibdeno	Mo	0,1	1

Fuente: Adaptado de Taiz y Zeiger (2010).

*Valores de los nutrientes no esenciales y macronutrientes expresados en porcentaje y, valores de los micronutrientes expresados en ppm o mg kg⁻¹.

Los macronutrientes obtenidos del agua y del CO₂ de la atmósfera representan entre el 90% y 95% del peso de las plantas, en cambio, los macronutrientes y micronutrientes obtenidos del suelo representan entre el 5% y 10%, constituyen la denominada fracción mineral.

Dentro de esta fracción, el fósforo (P) constituye el objetivo de interés de este libro; debido a que los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan una alta retención o fijación de P, característica que influye en la rentabilidad de los cultivos y praderas.

Los sistemas productivos ganaderos de la Región de Los Lagos son esencialmente pastoriles, donde la disponibilidad de P afecta la producción, persistencia y calidad del forraje y, por ende, la producción de carne y leche. Por ello, el P es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las praderas.

El P es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y cumple importantes funciones bioquímicas y fisiológicas (Marscher, 1995) formando parte de biomoléculas (enzimas y proteínas) involucradas en los procesos de transferencia y almacenaje de energía (ATP). También forma parte de ácidos nucleicos (ADN y ARN) y de fosfolípidos de membranas celulares.

Desde el punto de vista agronómico y de producción vegetal, el P cumple un rol en importantes funciones, como:

- i) Estimular el crecimiento y expansión foliar,**
- ii) Promover el crecimiento de las raíces y,**
- iii) Mejorar la calidad de frutos, granos, etc.**

Las plantas absorben el P en su forma inorgánica desde la solución del suelo (Lindsay, 1979), preferentemente como H₂PO₄⁻ (a pH < 7,2) y HPO₄²⁻ (a pH > 7,2) y, a su vez, los animales que se alimentan en base a praderas pueden obtener parte de sus requerimientos de P de las diferentes especies prateras presentes en la pradera.

La concentración de P en las especies gramíneas y leguminosas puede fluctuar entre 0,22% a 0,36% y entre 0,18% a 0,47%, respectivamente. En cambio, su concentración en la solución del suelo es normalmente muy baja (0,01 a 3,0 mg kg⁻¹, Frossard *et al.*, 2000) e inadecuada para sostener el crecimiento vegetal; debido a que las deficiencias de P generan un menor desarrollo del área foliar afectando negativamente la captura de energía solar y el rendimiento.

La actividad agropecuaria de la Región de Los Lagos se desarrolla sobre suelos derivados de cenizas volcánicas que difieren profundamente de los suelos no volcánicos en sus propiedades físico-químicas, comportamiento y manejo; representados en mayor proporción por suelo Trumaos > suelo Rojo Arcillosos > suelos Nádís (Besoain, 1985).

Las principales limitaciones de fertilidad de los suelos volcánicos están reguladas por las condiciones de acidez natural, la cual implica bajo contenido de bases intercambiables, alto contenido de aluminio intercambiable y, por ende, alta saturación de aluminio y alta capacidad de adsorción de P.

Estas limitantes reducen la eficiencia de uso de los fertilizantes fosfatados solubles en agua; debido a que sólo el 10% del P aplicado como fertilizante fosfatado (Besoain y Sadzawka, 1999) es absorbido por las plantas. Es evidente que la baja eficiencia de la fertilización fosfatada significa no solo una fuerte pérdidas de divisas al país sino que involucra pérdida de producción y productividad.

A nivel nacional, el consumo de fertilizantes fosfatados se ha incrementado en los últimos años, en su mayoría son usados ya sea para corregir los niveles iniciales bajos de P presente en los suelos (fertilización de corrección), como para mantener los niveles de P (fertilización de mantención) una vez que se han alcanzado niveles tales de P, que no se observan respuestas positivas a la fertilización fosfatada.

En la fertilización fosfatada de corrección se requieren altas dosis de P; debido a la alta capacidad de adsorción de P que presentan los suelos volcánicos. La Región de Los Lagos consume al año aproximadamente 9.000 t de fertilizante fosfatado (ODEPA, 2010).

A nivel mundial, los fertilizantes fosfatados solubles en agua son los más usados pero como producto tienen un alto costo industrial; debido al uso de combustibles fósiles durante su proceso productivo, sin considerar la Huella de Carbono generada por su transporte desde el lugar de producción hasta el lugar de aplicación en campo.

Por otro lado, existe la Roca fosfórica (RF, fertilizante fosfatado insoluble) como una fuente alternativa de aplicación directa de P en suelos ácidos ($\text{pH} < 5,8$) con una concentración media a alta de P ($> 10 \text{ mg P kg}^{-1}$, estrata 0-10 cm) contribuyendo a la intensificación agrícola sustentable de especies de ciclo vegetativo largo, con alta actividad biológica, como las praderas (naturales, sembradas) o especies (*Brassicas* sp.) que puedan solubilizar el P desde la RF, logrando mantener la fertilidad del suelo, e incluso mejorar su concentración de P a largo plazo.

En relación a la calidad y efectividad potencial de los fertilizantes fosfatados comercializados actualmente, existen muchas interrogantes a nivel de productores y asesores de la Región de Los Lagos, tales como:

- i) Si las nuevas metodologías analíticas pueden determinar el aporte de P soluble de los fertilizantes fosfatados,**
- ii) Si es posible determinar la concentración de P disponible en el suelo independiente de la solubilidad del fertilizante fosfatado aplicado y,**
- iii) Cuál es el rol de los fertilizantes fosfatados en el ingreso de metales pesados al suelo.**

Frente a esta problemática, la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura de la Región de Los Lagos (SEREMI de Agricultura de la Región de Los Lagos) solicitó al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Remehue (INIA Remehue), realizar una consultoría técnica dentro del marco del Programa de Fomento “Transferencia Mejoramiento de la Capacidad Productiva de las Praderas”, BIP 30125789-0, que derivó en la firma de un Convenio de Cooperación entre ambas partes (según consta en el ORD. N°174 del 14 de Junio de 2013).

Se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo General:

Generar antecedentes técnicos sobre los fertilizantes fosfatados en la interfase suelo-planta que permitan mejorar las acciones del Programa de Suelos del Ministerio de Agricultura.

Objetivos Específicos:

1. Implementar nuevas metodologías para determinar los índices de solubilidad en los fertilizantes fosfatados y, el fósforo disponible en el suelo.
2. Cuantificar el efecto de diferentes fertilizantes fosfatados en el suelo, producción y calidad de forraje de praderas en la Región de Los Lagos.
3. Evaluar económicamente el efecto de diferentes fertilizantes fosfatados en la producción y calidad de forraje de praderas en la Región de Los Lagos.

Capítulo 1

SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS



1.1 Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas

Los suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona centro-sur de Chile tienen un gran impacto en la economía nacional, debido a que en ellos se desarrollan las principales actividades silvoagropecuarias del país.

La mineralogía de estos suelos está dominada por aluminosilicatos (alofán) y óxidos de hierro y aluminio caracterizados por su bajo grado de cristalinidad y difieren profundamente de los suelos no volcánicos en sus propiedades (físicas, químicas y biológicas), comportamiento y manejo; debido a las características únicas de su material parental que condicionan sus propiedades agronómicas.

Este tipo de suelos volcánicos poseen características favorables desde el punto de vista agrícola, tales como: estructuras bien definidas, alto contenido de materia orgánica (MO) en diferentes grados de humificación, alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) dependiente del pH, alto porcentaje de retención de humedad y baja densidad aparente (Besoain, 1985) y, algunas características desfavorables como: alta capacidad de adsorción de aniones, especialmente fósforo (P) (Vistoso *et al.*, 2009, 2012) y alta concentración de aluminio (Wada, 1985; Dahlgren *et al.*, 2004).

Se debe señalar que la nutrición de las plantas, la fertilidad y manejo de los suelos son función de la mineralogía (composición y estructura) y de la concentración de MO. Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan carga variable o dependiente del pH.

La carga superficial del suelo se genera en sus componentes orgánicos e inorgánicos. Las fuentes de carga superficial orgánica están constituidas por la MO y por los grupos funcionales asociados a los compuestos húmicos presentes en el suelo que son la mayor fuente de carga variable. En cambio, las fuentes de carga superficial inorgánica incluyen a todos los minerales de bajo y alto grado de cristalinidad que presentan carga permanente (White & Zelazny, 1986).

Entre los factores que afectan la carga superficial, el pH de la solución del suelo a través del suministro de H⁺ genera la adsorción de iones en solución (de importancia como macronutrientes o micronutrientes para las plantas) y la disociación de los grupos funcionales de la MO controlan las propiedades de carga superficial en los suelos de carga variable (Barrow, 1984; Mora & Barrow, 1996). De esta forma, la adsorción de P por los coloides del suelo aumenta con la disminución de pH (Parfitt, 1978).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas en Chile están representados en mayor proporción por los suelos Trumaos > > > suelos Rojo Arcillosos > > suelos Ñadis > suelos Pardo Arcillosos (Besoain, 1985). Los suelos Trumaos y los suelos Rojo Arcillosos son los de mayor importancia desde el punto de vista agrícola.

Los suelos Trumaos (Andisoles) son suelos formados a partir de cenizas volcánicas modernas, se encuentran en posición plana y lomaje de cerro (Besoain, 1985). Son de textura franco, friables con estratificaciones depositacionales claramente distinguibles entre el suelo y el subsuelo (Wright, 1965). Se caracterizan por presentar alofán (40% a 60%), en cambio, en los más antiguos coexiste algo de haloisita-7A con alofán y la presencia de gibsita, usualmente asociada a los suelos volcánicos antiguos, es el resultado de una activa participación orgánica (Besoain y Sepúlveda, 1985).

Se distribuyen desde la VI Región, llegando a formar un manto prácticamente continuo alrededor de los 36°30'LS. En la Depresión Central (Wright, 1965), a los 39°LS, casi toda la superficie entre ambas cordilleras se encuentra cubierta con suelos Trumaos. Se estima que la superficie ocupada por estos suelos entre Santiago y Puerto Montt alcanza a 3.282.148 has (Mella y Kühne, 1985).

Los suelos Rojo Arcillosos (Ultisoles) son suelos coincidentes en color (pardo rojizo) y textura (arcillo limosa), provenientes de diferentes materiales parentales, no estratificados (Besoain, 1985). Corresponden a cenizas volcánicas antiguas con meteorización avanzada y se encuentran en posición de lomaje. Se caracterizan por presentar arcillas haloisíticas (> 60%), gibsita, cuarzo, cristobalita y clorita.

Además, presentan contaminación alofánica en el horizonte superficial, proveniente de adiciones de cenizas volcánicas modernas (Besoain y Sepúlveda, 1985).

Se distribuyen en formaciones aisladas en la precordillera de la VII Región, alcanzando su mayor expresión entre los 37°-41°LS (Wright, 1965). Este tipo de suelo ocupa una superficie estimada en 665.335 has (Mella y Kühne, 1985).

1.2. Principales limitaciones de fertilidad de los suelos derivados de cenizas volcánicas

Los suelos derivados de cenizas volcánicas, presentan características físicas, químicas y biológicas particulares, destacándose por presentar características favorables desde el punto de vista agrícola, tales como estructuras bien definidas, alta retención de humedad y baja densidad aparente. Además, presentan alta concentración de MO y una alta CIC.

Bernier (1982), señala que las principales deficientes nutritivas en los suelos de la Región de Los Lagos, se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Suelos de lomaje de la Precordillera de los Andes: $K \gg P \gg Mg > S$.
- Suelos de lomaje de la Depresión Intermedia: $P \gg N \gg K$.

- Suelos Rojo Arcillosos de la Precordillera de la Costa: MO \Rightarrow N \gg S \gg P.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas, la dinámica de los nutrientes está regulada por las condiciones de acidez natural, altas concentraciones de aluminio intercambiable y su alta capacidad de adsorción de aniones como fosfatos, molibdatos (Vistoso *et al.*, 2009; 2012) y sulfatos (Jara *et al.*, 2006).

La condición de acidez natural que impera en este tipo de suelos, se genera lenta y progresivamente, bajo condiciones de alta pluviometría, e implica una baja concentración de bases intercambiables (calcio, Ca²⁺; magnesio, Mg²⁺; potasio, K⁺ y sodio, Na⁺), una alta concentración de aluminio intercambiable y, por ende, un alto porcentaje de saturación de aluminio y una alta capacidad de adsorción de P (85–95% en suelos Trumaos (>85%, Besoaín y Sadzawka, 1999).

Estas limitantes, reducen la eficiencia de uso de los fertilizantes fosfatados solubles en agua; debido a que sólo el 10% del P aplicado como fertilizante fosfatado (Besoaín y Sadzawka, 1999) puede ser absorbido por el sistema radical de las plantas, reduciendo la eficiencia de fertilización fosfatada. Por lo tanto, no es sorpresa que la producción, persistencia y calidad del forraje y, por ende, la producción de carne y leche de los sistemas productivos ganaderos de la Región de Los Lagos (esencialmente pastoriles) dependa de una práctica de manejo común como lo es la fertilización fosfatada.

Capítulo 2

EL FÓSFORO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS



2.1 Funciones del fósforo en la planta

Marscher (1995) indica que desde el punto de vista bioquímico y fisiológico la esencialidad del P radica en que este macronutriente cumple importantes funciones formando parte de biomoléculas (enzimas y proteínas) involucradas en los procesos de almacenaje y transferencia de energía (adenosín trifosfato, ATP) en el corto plazo y, proporcionar la energía para las reacciones de la vida a través de los reinos vegetal y animal (Figura 1).

Además, los grupos fosfato y sus enlaces forman parte de ácidos nucleicos (ácido desoxirribonucleico, ADN y ácido ribonucleico, ARN), son constituyentes de fosfolípidos en las membranas celulares y, cumplen funciones en el transporte y absorción de macronutrientes y micronutrientes por las plantas.



Figura 1. Funciones del fósforo en la planta.

Por otro lado, desde el punto de vista agronómico y de producción vegetal (Figura 1), el P cumple un rol en importantes funciones, como:

- i) Estimular el crecimiento y expansión foliar,**
- ii) Promover el crecimiento de las raíces y,**
- iii) Mejorar la calidad de frutos, granos, etc.**

En diferentes especies vegetales se ha observado que la deficiencia de P afecta negativamente la captura de energía solar y, en consecuencia, el rendimiento final del cultivo o pradera (Sandaña y Pinochet, 2011; Sandaña *et al.*, 2012; Sandaña y Kalazich, 2015).

Por ello, el P es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las praderas. Una vez superado su déficit, se asegura la mayor eficiencia en la aplicación al suelo de otros macronutrientes esenciales, tales como: N, S, K, Mg.

2.2 Transformaciones del fósforo en los suelos derivados de cenizas volcánicas

Los suelos representan la única reserva significativa de P para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, el 50% de la superficie de suelos agrícolas del país presentan bajas concentraciones de P disponible y, por lo tanto, el P es un factor limitante para la producción de cultivos y praderas.

La baja disponibilidad de P se relaciona con la alta reactividad que presenta el P con los coloides del suelo y la rizósfera (Borie y Zunino, 1983; Hinsinger, 2001). En Chile, los suelos que presentan estas características corresponden a los suelos derivados de cenizas volcánicas y ocupan una superficie de 5.288.070 has (Besoain, 1985).

La concentración de P total en el suelo depende de los siguientes factores:

- i) Naturaleza del material parental,**
- ii) Proceso de meteorización,**
- iii) Extracción de los cultivos o praderas y,**
- iv) Aplicación de fuentes fosfatadas (fertilizantes fosfatados y enmiendas orgánicas).**

La concentración de P total puede fluctuar entre 90 mg kg⁻¹ en suelos arenosos a 2.000 mg kg⁻¹ en suelos derivados de rocas básicas (Sharpley, 2000). En los suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona sur del país se han determinado valores que fluctúan entre 940 - 1.725 mg kg⁻¹ (Rodríguez, 1993), sin embargo, sólo el 2% del P total se encuentra en formas disponibles para ser absorbidas por el sistema radical de las plantas. Por ello, el P total no representa un valor práctico y se considera una reserva de P que podrá estar disponible a través del tiempo.

Generalmente, entre el 50% al 64% del P total en los suelos se encuentra en forma orgánica (654 - 1.940 mg P orgánico kg⁻¹, Borie *et al.*, 1989) muy estable y donde el proceso de mineralización es muy lento. Sin embargo, en suelos deficientes en P, dicho proceso permite que sea una fuente importante de P tanto para las plantas como para los microorganismos.

En la Figura 2, se pueden observar las relaciones de intercambio entre las diferentes formas de P en los suelos derivados de cenizas volcánicas.

El P mineral o inorgánico se encuentra formando parte de los compuestos de apatita, estregita y variscita en el material parental (rocas ígneas), el cual solo podrá ser liberado por el proceso de meteorización a través de la lenta acción del clima a lo largo del tiempo y, de los ácidos naturales generados por bacterias del suelo, hongos y raíces de las plantas, contribuyendo a una proporción variable de P en solución del suelo.

Entre las formas de P inactivas, están los compuesto de P ocluído en los hidróxidos de Al, Fe y Mn, los cuales presentan baja solubilidad y escasa disponibilidad para las plantas.

El P debe estar en la solución del suelo para ser absorbido por las raíces de las plantas. La concentración de P en solución y su mantención durante el desarrollo de un cultivo o pradera es un parámetro relevante para la adecuada nutrición de las plantas. Sin embargo, la concentración de P en solución del suelo es normalmente muy baja ($0,01 - 3,0 \text{ mg kg}^{-1}$; Frossard *et al.*, 2000) e inadecuada para sostener el crecimiento y desarrollo vegetal.

Esta deficiencia de P genera un menor desarrollo del área foliar (hojas) afectando negativamente la captura de energía solar y el rendimiento de cultivos y praderas. Por lo tanto, es importante considerar el equilibrio químico entre la fase de solución y la fase sólida de P en los suelos para finalmente entender cómo se restituye el P en solución del suelo (Figura 2).

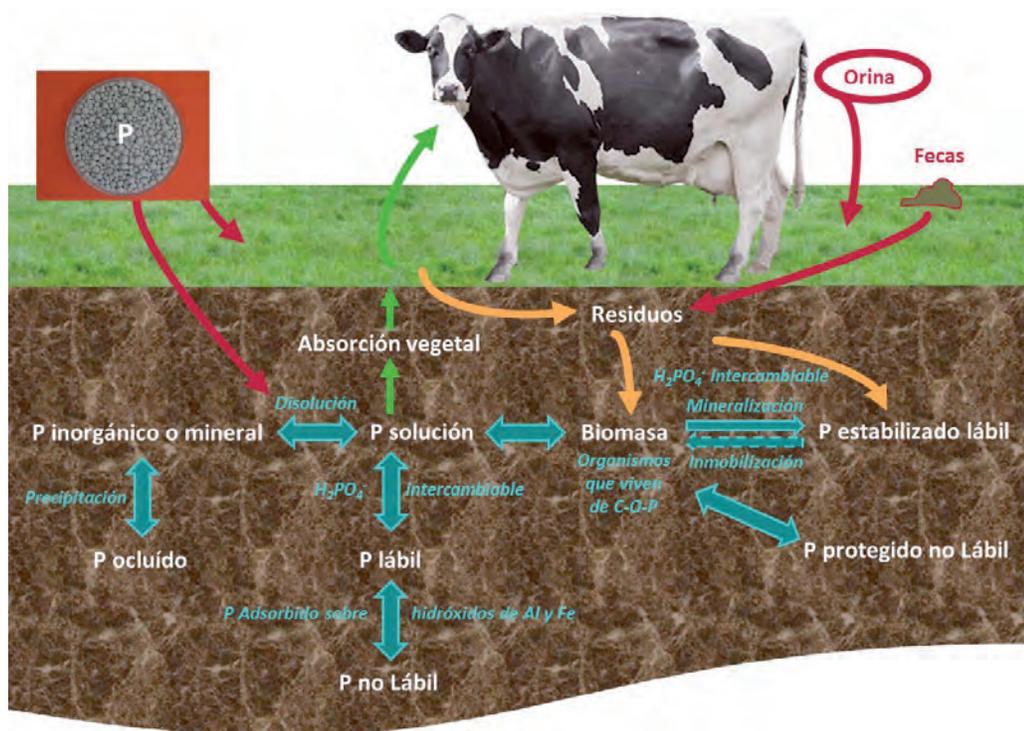


Figura 2. Ciclo del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas.

Las diferentes formas inorgánicas y orgánicas de P se pueden clasificar según su labilidad o biodisponibilidad para las plantas. El P lábil se encuentra en equilibrio dinámico con el P en la solución del suelo. A su vez, la fracción de P en solución se encuentra en equilibrio con las formas lábiles de P inorgánico y P orgánico.

La fracción de P lábil disminuye a través de la extracción de los cultivos y praderas y, por su transformación a formas de P no lábiles inorgánicas (etapa de reacción lenta con la fase sólida del suelo, ya que a través del tiempo una menor fracción del P aplicado al suelo permanece en el pool lábil) u orgánicas (inmovilización).

La fracción de P lábil que permanece con posterioridad a la aplicación de P al suelo y a la extracción del cultivo o pradera, se denomina P residual.

La concentración de P orgánico proveniente de los residuos es baja y una mínima fracción se transforma a la P lábil. Sin embargo, al incorporar altas cantidades de residuos o pradera se debe considerar que hasta un 30% de la cantidad agregada, a través del proceso de mineralización, liberará formas de P que formarán parte del pool de P orgánico lábil.

Estos antecedentes indican que el P tiene un rol determinante en la producción agropecuaria de los suelos derivados de cenizas volcánicas del país, los cuales presentan bajas concentraciones de P disponible; debido a la alta capacidad de adsorción de P que estos suelos presentan y, por ende, el P un factor limitante en la producción de cultivos y praderas de la zona sur del país.

2.3 Absorción de fósforo por las plantas

Tanto los macronutrientes como los micronutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas desde la solución del suelo hacia el interior de las células vegetales, donde son almacenados, metabolizados o transportados a otras células, tejidos u órganos vegetales.

Las plantas absorben P en su forma inorgánica (Linsay, 1979) a través de su sistema radical desde la solución del suelo, preferentemente como ión ortofosfato (Figuras 2 y 3).

El predominio de las formas monovalente y divalente del ión ortofosfato es función del pH del suelo (Figura 3). En los suelos derivados de cenizas volcánicas predomina la forma monovalente del ión ortofosfato (H_2PO_4^-); debido a que estos suelos presentan valores de pH que fluctúa entre 4,5 a 6,5 (Sadzawka y Carrasco, 1985).

Bajo condiciones de equilibrio, la concentración del P en solución es de $0,05 \text{ mg P l}^{-1}$ y puede aumentar a $1-2 \text{ mg P kg}^{-1}$ en la zona de reacción de los fertilizantes (Havlin *et al.*, 1999). La mantención de la concentración en equilibrio del P en solución a través del desarrollo de cultivos y praderas es un importante parámetro del suministro de P del suelo.

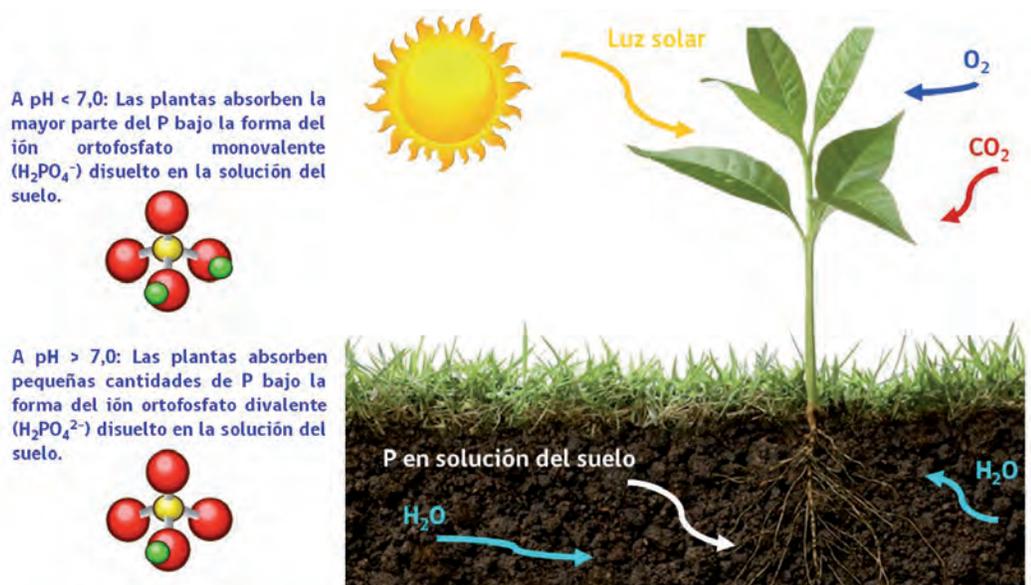


Figura 3. Absorción de fósforo por las plantas.

El P en la solución del suelo se transporta hacia las raíces de las plantas a través de dos procesos:

- i) **Difusión:** desde una zona de alta concentración de iones H_2PO_4^- cercana de la superficie del suelo a una zona de baja concentración en la superficie de la raíz de la planta y,
- ii) **Flujo de masas:** los iones H_2PO_4^- son transportados a través de la absorción neta de agua por las raíces de las plantas o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece.

El proceso de difusión depende de varios factores del suelo, tales como: humedad, textura, temperatura y, capacidad tampón de P.

El movimiento de P en suelo es muy bajo en la mayoría de los suelos, por lo tanto, el proceso de flujo de masas es menos relevante en la absorción de P por la planta que el proceso de difusión; debido a una mayor concentración de P en el horizonte superficial del suelo (0-5 cm).

La acumulación de P en la superficie de los suelos representa una significativa fuente de P para la solución del suelo, sin embargo, el P es más propenso a perderse por escorrentía y erosión hídrica desde las áreas agrícolas hacia fuentes de agua superficiales (lagos, corrientes de agua, etc.), contribuyendo a la eutroficación de ellas (Sims *et al.*, 1998).

Debido a que la capacidad de suministro de P de un suelo es función de su capacidad tampón de P (CP), en los suelos que presentan un alto CP se requiere una alta concentración de P total para suministrar P adecuadamente a la solución del suelo y satisfacer los requerimientos de los cultivos y praderas. Por lo tanto, cuando los suelos no son capaces de suministrar los nutrientes esenciales en las cantidades que requieren las especies vegetales (demanda del nutriente) para alcanzar el potencial de crecimiento de un cultivo o pradera, se hace necesario la aplicación de fertilizantes.

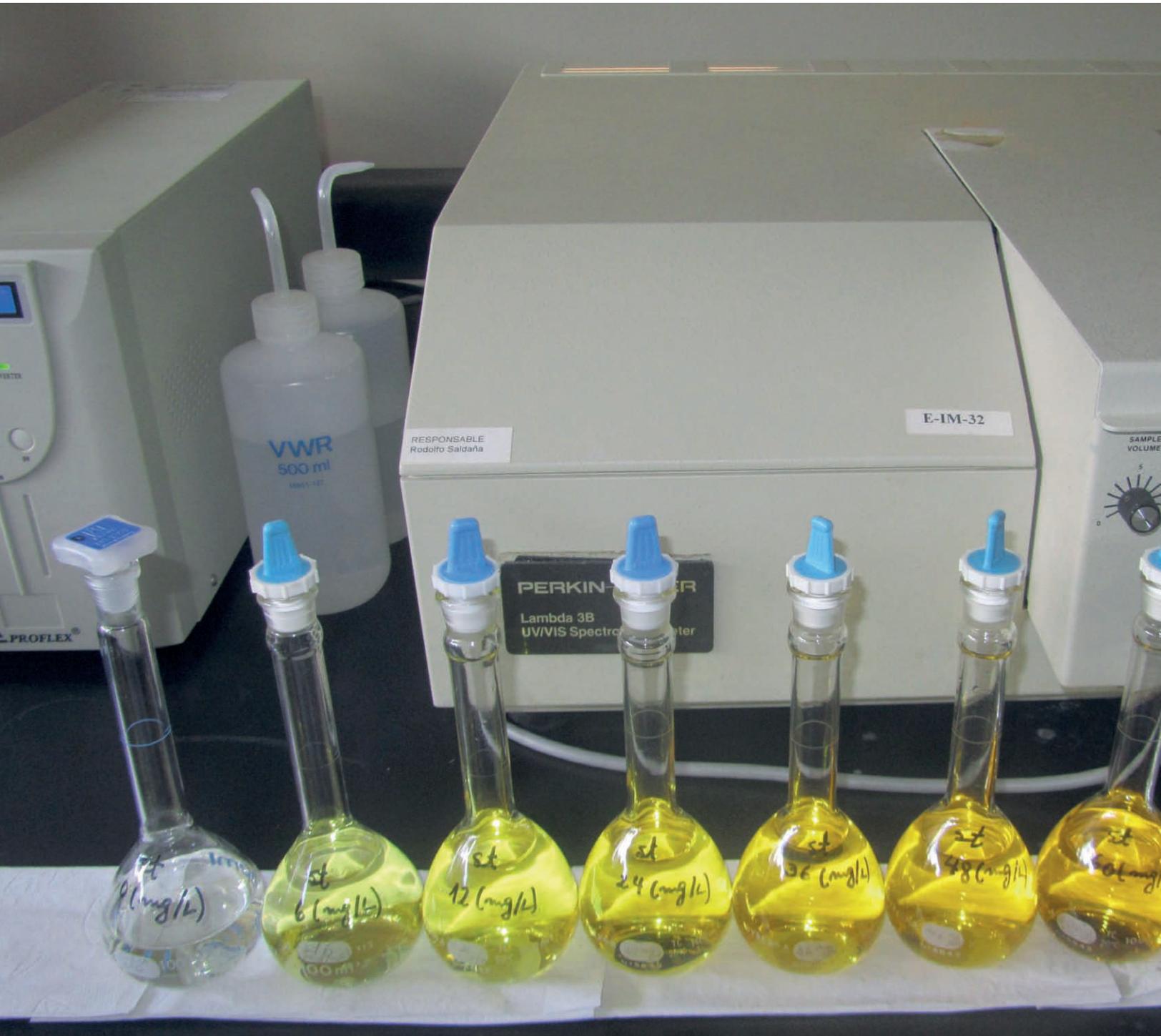
Por otro lado, la concentración de P en las especies pratenses gramíneas y leguminosas puede fluctuar entre 0,22% a 0,36% y entre 0,18% a 0,47% (Anrique *et al.*, 2008; Whitehead, 2000), respectivamente.



Capítulo 3

MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS SUELOS PARA SUMINISTRAR FÓSFORO A LAS PLANTAS

.....



El suministro de P en los suelos está asociado a diferentes fracciones de P en estrecho equilibrio entre sí (Figura 2). A su vez, en el suelo existe el siguiente orden decreciente de algunas de las formas de P: P mineral >>>> P lábil >> P en solución.

El P disponible en el suelo, en el corto plazo, corresponde al P en solución y al P adsorbido débilmente (P lábil) en la fase sólida del suelo (superficie coloidal) de rápida disponibilidad para las plantas (Figura 4). Los procedimientos de extracción química de P desarrollados indican estas dos formas de P.



Figura 4. Disponibilidad de fósforo en el suelo para las plantas.

La decisión de cuál y cuanto fertilizante fosfatado aplicar, requiere conocer el suministro de P del suelo. *En post* de alcanzar una concentración de P disponible adecuada para lograr el rendimiento máximo del agroecosistema. Por lo tanto, es función del profesional o técnico de terreno diagnosticar el suministro de P del suelo y establecer las estrategias para alcanzar una concentración de P adecuada para el crecimiento óptimo del cultivo o pradera.

Entre los métodos de diagnóstico están el análisis foliar y el análisis de suelo. Al relacionar estos resultados analíticos con los requerimientos de las especies prateras permitirá establecer las estrategias para alcanzar el nivel de fertilidad adecuado en el suelo. Debemos tener en cuenta que la fertilización de las praderas es una inversión de mediano a largo plazo, donde la aplicación de los nutrientes deficitarios deberá considerar aspectos como la condición de la pradera, productividad, utilización y características edafoclimáticas de cada localidad en particular.

El principio químico del análisis de suelo consiste en extraer mediante una solución química (solución extractante) una fracción total del nutriente esencial y, posteriormente, medir la concentración solubilizada en dicha solución con procedimientos adecuados. El significado agronómico de esta fracción representa una proporción del nutriente esencial que el cultivo o pradera requiere para su desarrollo y producción.

En el país, el análisis de la concentración de P en el suelo se realiza a través de la metodología Olsen (P Olsen). El P Olsen cuantifica la fracción lábil (P inorgánico y P orgánico débilmente adsorbido en la superficie coloidal del suelo), en cambio, la metodología de la resina de intercambio iónico (P Resina) cuantifica el P inorgánico directamente intercambiable con la solución del suelo. Por ello, esta última metodología

podría ser más apropiada para cuantificar el aporte de P disponible en suelos fertilizados con fertilizantes fosfatados independiente de su solubilidad.

La metodología de la resina de intercambio iónico (P Resina) se basa en reacciones de adsorción y desorción, utilizando un material sintético con cargas positivas que adsorben el P desde la solución del suelo imitando el mecanismo de absorción de P de la raíz de la planta (Figura 5).

En este proceso, el P disponible del suelo es transportado a través de la solución del suelo hacia las raíces creando un gradiente de concentración que promueve la disolución del P lábil en la fase sólida del suelo y el proceso de difusión de P hacia las raíces de la planta.



Figura 5. Mecanismo de adsorción de fósforo de la metodología de la resina de intercambio iónico.

La implementación de la metodología de la resina de intercambio iónico para determinar el P disponible en el suelo, independientemente de la solubilidad del fertilizante fosfatado, se realizó a través de la adaptación del protocolo oficial de análisis de suelos de Nueva Zelanda, contando con la colaboración del Sr. Surinder Sagggar, Ph.D., Professor, Landcare Research, Nueva Zelanda.

La metodología de la resina de intercambio iónico (P Resina) es un importante avance en el desarrollo de una metodología en el análisis de suelo con propiedades relevantes que la diferencian de la metodología Olsen. Debido a que la metodología Olsen se realiza a un pH alto (8,5), durante su proceso de extracción se libera P adsorbido en la superficie

coloidal que sobreestima el P disponible para la planta. En cambio, el procedimiento de extracción de la metodología de la resina de intercambio iónico se realiza al pH del suelo, por lo tanto, el efecto anterior no se genera.

Por otro lado, una ventaja adicional del método de la resina de intercambio iónico es que permite determinar simultáneamente múltiples macronutrientes esenciales (como: sulfato, nitrato, amonio y potasio; Schoenau y Huang, 1991).



Capítulo 4

EFECTO DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS SOBRE EL RENDIMIENTO ACUMULADO Y FÓSFORO DISPONIBLE EN EL SUELO

.....



En los estudios realizados por INIA Remehue, a través del Convenio de Cooperación, se incluyó el procedimiento de calibración del método de la resina de intercambio iónico.

Este método, se aplicó en los ensayos de campo en que se llevaron a cabo en praderas sobre suelos Trumaos con alto y medio-alto nivel de fertilidad en las localidades de Remehue (P Olsen inicial: 23 ppm o mg kg^{-1}) y Purranque (P Olsen inicial: 18 ppm o mg kg^{-1}) y, con deficitario nivel de fertilidad en la localidad de Fresia (P Olsen inicial: 11 ppm o mg kg^{-1}), en los cuales se relacionó el análisis de suelo (P disponible: P Olsen y P Resina) con los rendimientos acumulados de las pradera evaluadas.

En las Figuras 6 y 7, podemos observar la relación entre el rendimiento acumulado en praderas durante dos años y la disponibilidad de P, este último determinado a través del método de la resina de intercambio iónico (P Resina) y por el método Olsen (P Olsen).

Los resultados obtenidos, indican una estrecha asociación entre el rendimiento acumulado y la concentración de P Resina, siendo significativos ($p < 0,0001$; R entre 0,78 y 0,91) en los diferentes tratamientos de los fertilizantes fosfatados evaluados (Figuras 6 y 7).

Sin embargo, la concentración de P Olsen sólo fue significativa en el ensayo de fertilización fosfatada de corrección, en los diferentes tratamientos de P_2O_5 aplicados como Roca fosfórica (RF) y Superfosfato triple (SFT) evaluados, donde presentó un ajuste con un coeficiente de determinación menor (R entre 0,75 a 0,81), corroborando investigaciones realizadas por Saggar *et al.* (1999).

Los diferentes tipos de análisis de suelo (métodos Olsen y resina de intercambio iónico) deben determinar de igual forma la concentración de P en suelos donde previamente se ha aplicado fertilizante fosfatado insoluble o soluble.

Los resultados que se presentan en la Figuras 6 y 7, se puede atribuir a que la extracción con NaHCO_3 0,5M a pH 8,5 (P Olsen) extrae las fracciones de P inorgánico débilmente adsorbido en los coloides del suelo y el P orgánico fácilmente hidrolizable.

Sin embargo, no genera una disolución significativa de los fertilizantes fosfatados durante su proceso de extracción que represente su lento y continuo aporte de P al suelo (Saggar *et al.*, 1992).

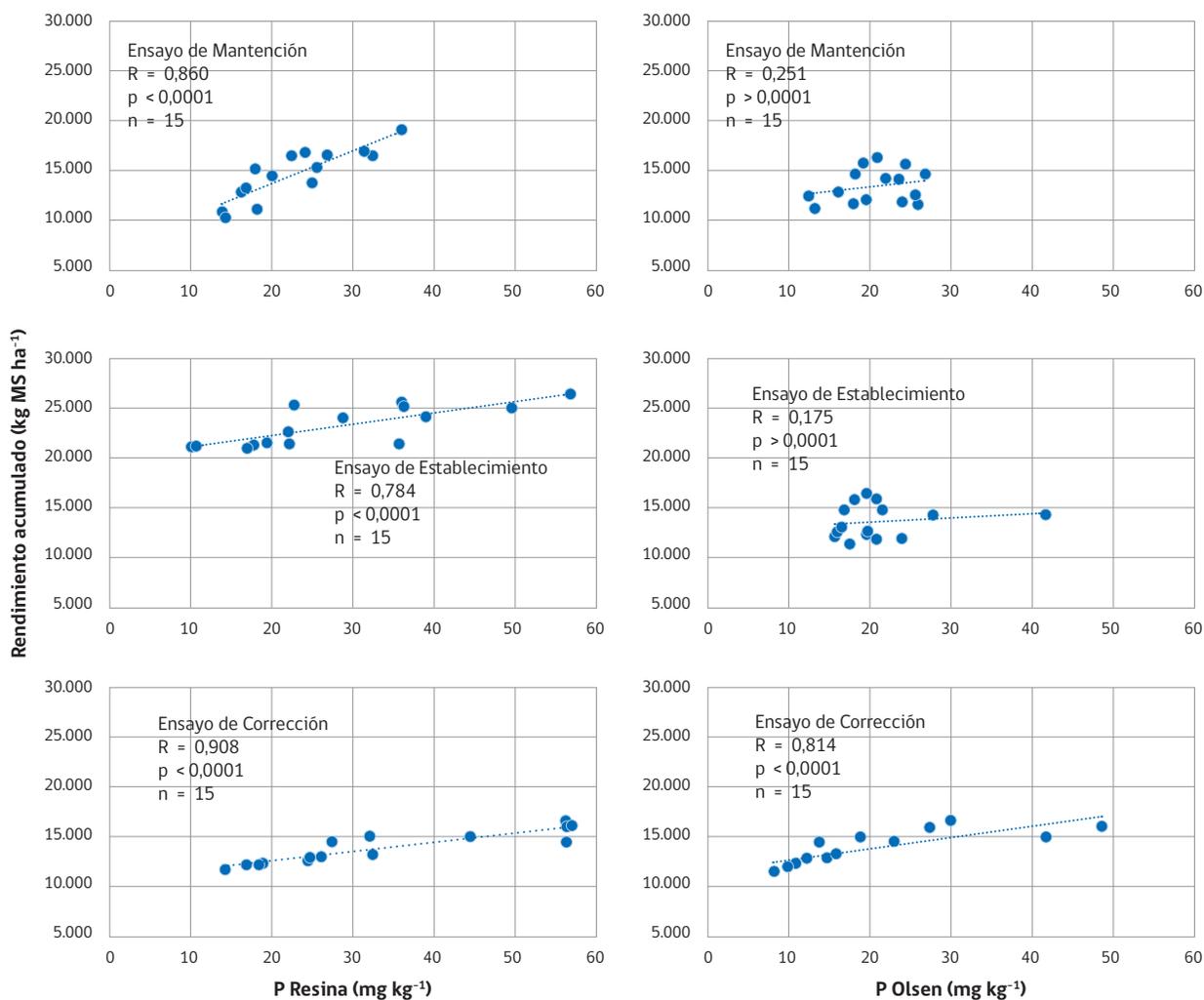


Figura 6. Efecto de la aplicación de fertilizante fosfatado soluble de mantención, establecimiento y corrección sobre la relación entre el rendimiento acumulado de materia seca y la concentración fósforo disponible determinado con el método de resina de intercambio iónico y método Olsen en suelos Trumao bajo pradera.

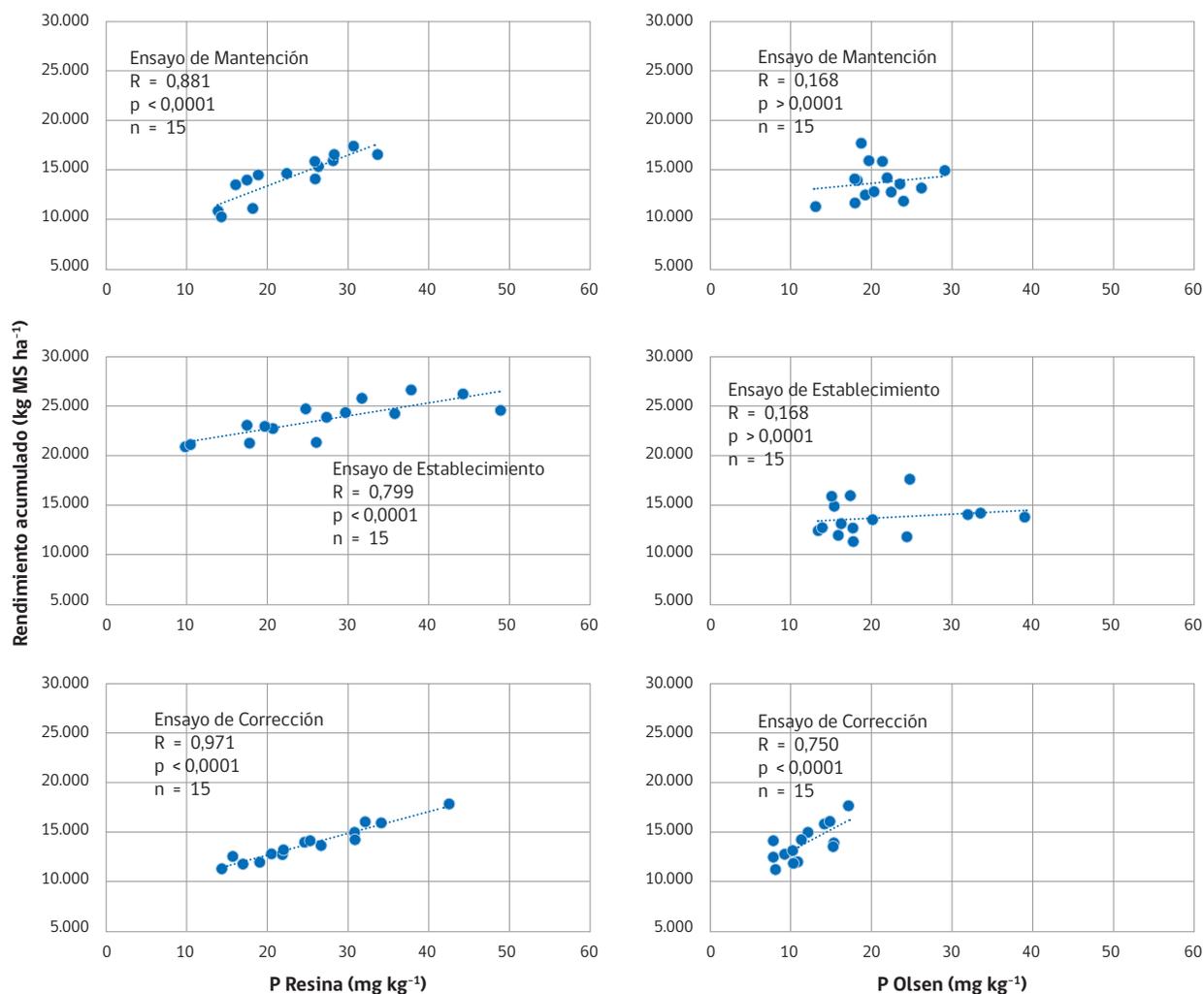


Figura 7. Efecto de la aplicación de fertilizante fosfatado insoluble de mantención, establecimiento y corrección sobre la relación entre el rendimiento acumulado de materia seca y la concentración fósforo disponible determinado con el método de resina de intercambio iónico y método Olsen en un suelos Trumaos bajo pradera.

En cambio, el método de la resina de intercambio iónico extrae el P inorgánico intercambiable de la solución del suelo, considerado biológicamente más disponible para las plantas (Perrot y Methereil, 1997) independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

Estos resultados (Figuras 6 y 7) sugieren que el P Resina es capaz de representar mejor la variación en la respuesta de producción de la pradera que el P Olsen, pudiendo constituirse en una herramienta de evaluación de fertilidad y disponibilidad de P en el

suelo, como un indicador apropiado para determinar la concentración de P en la solución de suelos derivados de cenizas volcánicas independiente de la solubilidad del fertilizante fosfatado aplicado.

Sin embargo, estos resultados no pueden ser replicables a otras condiciones edafoclimáticas de la Región de Los Lagos, por ello, se requiere de posteriores evaluaciones del comportamiento y calibración de la metodología de la resina de intercambio iónico en la determinación de P disponible en la solución del suelo, que consideren otros tipos de suelos volcánicos (suelos Rojo arcillosos, suelos Ñadis) representativos de la Región de Los Lagos.

Finalmente, se relacionó el análisis de suelo con las dosis de P_2O_5 de fertilización fosfatada (Superfosfato triple, SFT y Roca fosfórica, RF) de mantención, establecimiento y corrección evaluada.

La concentración de P disponible, al final de dos temporadas de evaluación y en una aplicación de tratamientos, determinada con la metodología de la resina de intercambio iónico en un suelo Trumao con alto nivel de P inicial (23 mg kg^{-1}) aumentó significativamente ($p < 0,05$; Figura 8) por efecto de dosis crecientes de P aplicadas ya sea como roca fosfórica o como superfosfato triple, ajustándose a un modelo lineal.

Por otro lado, la concentración de P disponible determinada con la metodología Olsen indicó que no existe un efecto significativo ($p > 0,05$; Figura 8) de la dosis de $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$, independiente de la fuente de P aplicada (RF o SFT).

La concentración de P disponible, al final de dos temporadas de evaluación y en una aplicación de tratamientos, determinada con la metodología de la resina de intercambio iónico en un suelo Trumao con medio-alto nivel de P inicial (18 mg kg^{-1}) da cuenta de incrementos significativos ($p < 0,05$; Figura 9) por efecto de la aplicación de dosis crecientes de P_2O_5 con roca fosfórica o superfosfato triple, ajustándose a un modelo lineal y a un modelo cuadrático, respectivamente.

Por su parte, la concentración de P disponible determinada con la metodología Olsen no indica una respuesta al efecto de la dosis y la fuente de P ($p > 0,05$; Figura 9).

La concentración de P disponible, al final de dos temporadas de evaluación y en una aplicación de tratamientos, determinada con las metodologías de la resina de intercambio iónico y Olsen en un suelo Trumao con deficitario nivel de P inicial (11 mg kg^{-1}) aumentó significativamente ($p < 0,05$; Figura 10) por efecto de dosis crecientes de P_2O_5 aplicadas ya sea como RF o como SFT, ajustándose ambas metodologías a un modelo lineal.

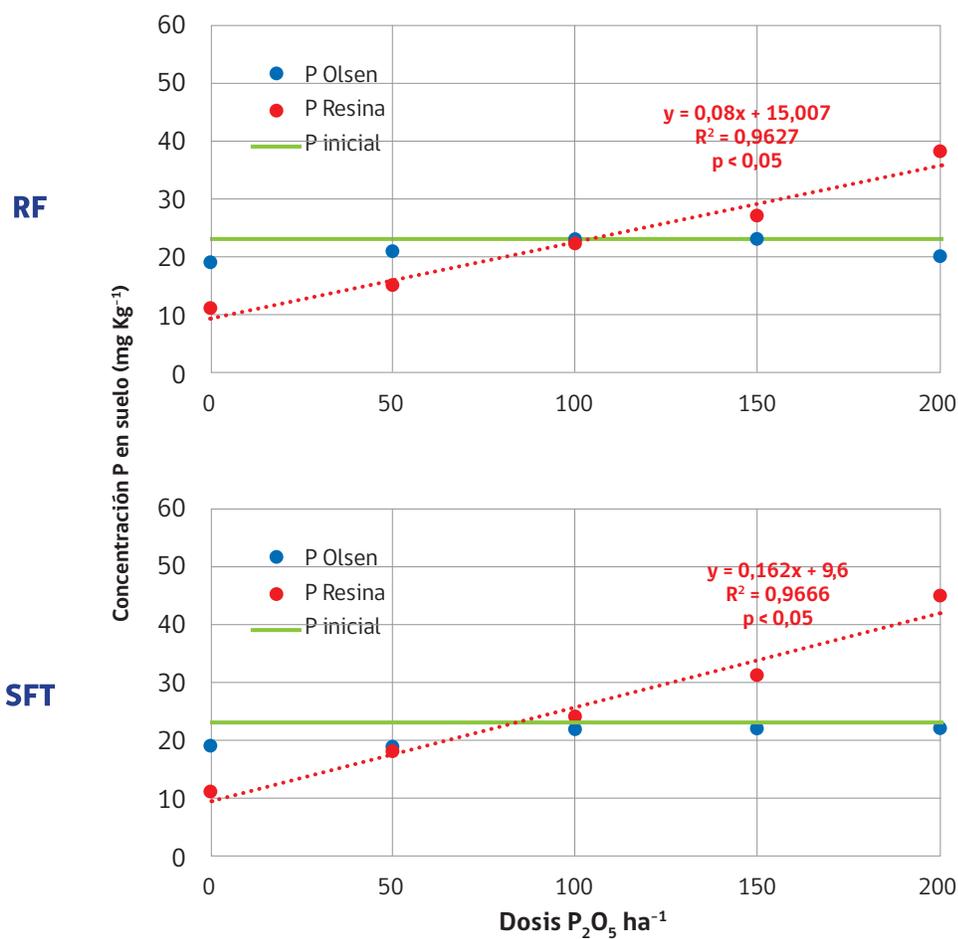


Figura 8. Efecto de la dosis de P_2O_5 en la fertilización fosfatada de mantención, en INIA Remehue, con Roca fosfórica (RF) y Superfosfato triple (SFT) sobre el P disponible determinado con el método de resina de intercambio iónico y método Olsen en un suelo Trumao.

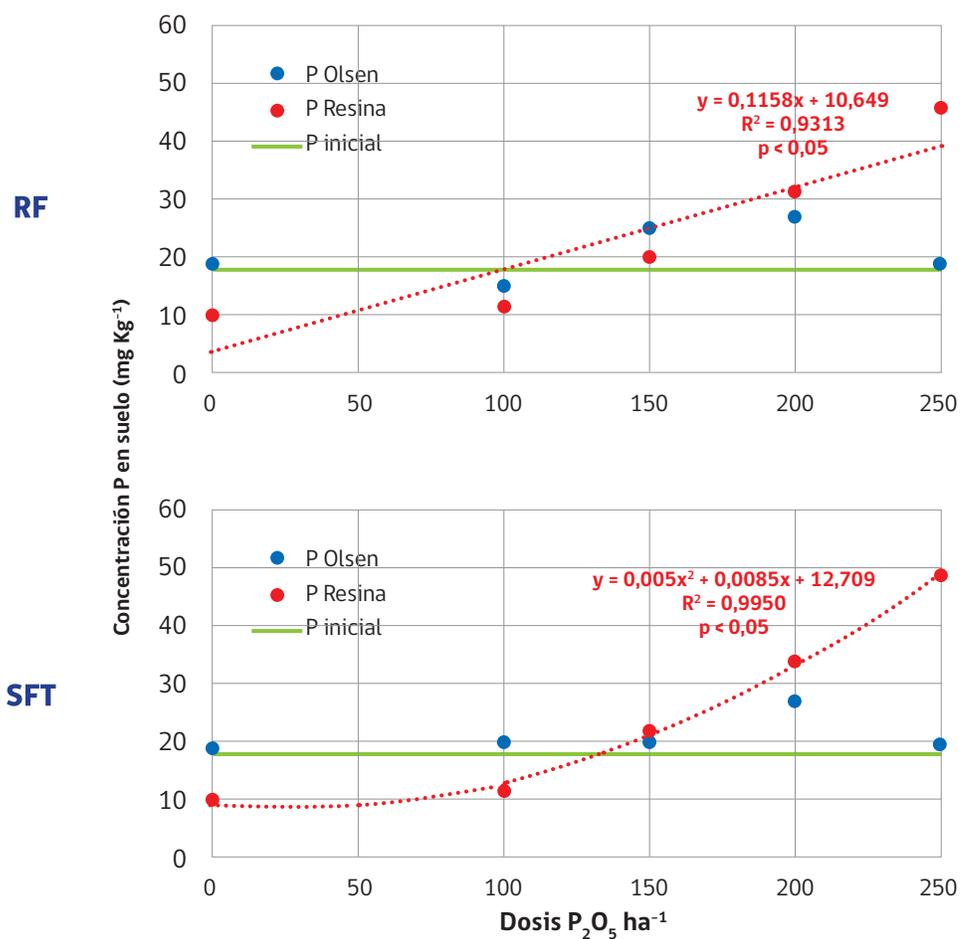


Figura 9. Efecto de la dosis de P_2O_5 en la fertilización fosfatada de establecimiento, en el Centro Experimental INIA La Pampa, Purranque, con Roca fosfórica (RF) y Superfosfato triple (SFT) sobre el P disponible determinado con el método de resina de intercambio iónico y método Olsen en un suelo Trumao.

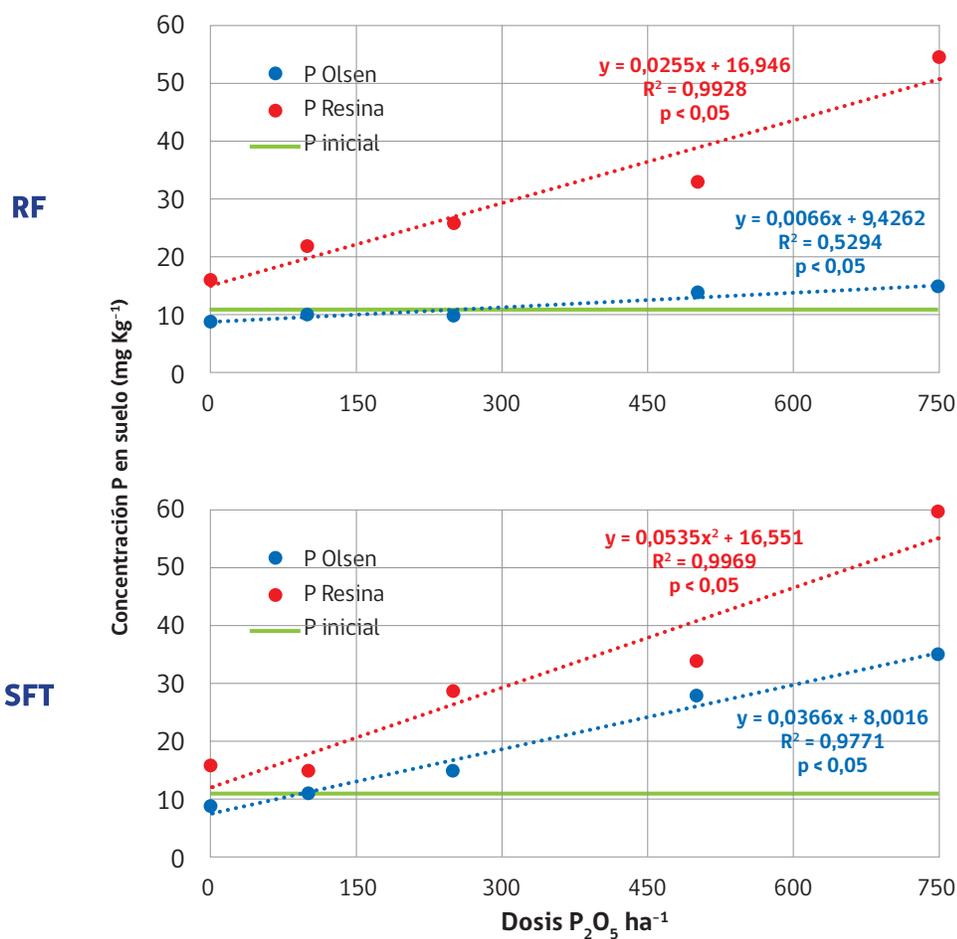


Figura 10. Efecto de la dosis de P₂O₅ en la fertilización fosfatada de corrección, en Fresia, con Roca fosfórica (RF) y Superfosfato triple (SFT) sobre el P disponible determinado con el método de resina de intercambio iónico y método Olsen en un suelo Trumao.

Capítulo 5

FERTILIZANTES FOSFATADOS



Los fertilizantes y otras enmiendas del suelo que contienen P se aplican a los suelos agrícolas para aumentar el pool de P disponible para las plantas y eliminar las deficiencias de suministro de P disponible para la productividad vegetal.

La eficacia de los fertilizantes fosfatados radica en que deben generar un aumento de la concentración de P en la solución del suelo para ser absorbidas por las raíces de las plantas.

Tradicionalmente, los fertilizantes fosfatados solubles en agua son los más usados pero como producto tienen un alto costo industrial; debido al uso de combustibles fósiles durante su proceso productivo, sin considerar la Huella de Carbono generada por su transporte desde el lugar de producción hasta el lugar de aplicación en campo. Parte del costo en transporte, también lo presentan los fertilizantes fosfatados insolubles (Roca fosfórica, RF).

A su vez, los fertilizantes fosfatados varían en la velocidad a la cual liberan el P disponible al suelo y, se pueden agrupar en fertilizantes fosfatados solubles en agua (liberación rápida de P) y fertilizantes fosfatados insolubles en agua (liberación lenta de P).

El P contenido en los fertilizantes fosfatados solubles (Fosfato monoamónico, FMA; Fosfato diamónico, FDA; Superfosfato triple, SFT) está inmediatamente disponible para la absorción de las raíces de la planta desde el suelo.

Estas fuentes de P pueden ser aplicadas durante el período de crecimiento de las especies prateras en otoño o a principios de primavera, siempre y cuando el suelo presente un adecuado suministro de azufre (S) disponible para las plantas.

En cambio, la velocidad de liberación de P de la RF es función del tipo de RF, de las propiedades químicas del suelo, de la temperatura del suelo y de las precipitaciones del área geográfica (procesos edafoclimáticos). Chien (2003) indica que se puede liberar entre 20% a 30% del P anualmente después de su aplicación al suelo, de acuerdo a su escala de reactividad.

La RF puede ser aplicada directamente en suelos derivados de cenizas volcánicas que entre sus parámetros químicos presenten un pH en agua $< 5,8$ y un nivel medio a alto de concentración de P ($> 10 \text{ mg P kg}^{-1}$, estrata 0-10 cm), contribuyendo a la intensificación agrícola sustentable de especies de ciclo vegetativo largo, con alta actividad biológica, como las praderas (naturales, sembradas) o especies (*Brassicas* sp.) que puedan solubilizar el P desde la RF (excreción de ácidos orgánicos desde sus raíces), logrando así, mantener la fertilidad del suelo e incluso aumentar la concentración de P a largo plazo.

Por su parte, la calidad y efectividad agronómica de los fertilizantes fosfatados (Chien *et al.*, 2009) depende de los siguientes factores:

- i) Solubilidad**
- ii) Composición química**
- iii) Reacción química en la solución del suelo.**

La solubilidad constituye la primera aproximación para predecir la reactividad química de un fertilizante y, en el caso de los fertilizantes fosfatados nos indica la proporción de P_2O_5 que está inmediatamente disponible para los cultivos y praderas. La solubilidad de los fertilizantes fosfatados se puede determinar a través de metodologías analíticas que extraen el P soluble con diferentes soluciones extractantes (Cuadro 2 y Figura 11).

Cuadro 2. Metodologías de solubilidad para fertilizantes fosfatados.

Solución extractante	Fración de P_2O_5
Citrato de amonio neutro a pH 7,0 (IFDC, 2007)	Fosfato soluble en solución de citrato de amonio neutro a pH 7,0
Ácido cítrico al 2% (IFDC, 2007)	Fosfato soluble en solución de ácido cítrico al 2%
Agua (AOAC, 2007)	Fosfato que puede ser disuelto en agua



Figura 11. Determinación del fósforo soluble en fertilizantes fosfatados extraído con solución de ácido cítrico al 2%, a través de la técnica colorimétrica del vanado molibdato en un espectrofotómetro UV-Visible.

A nivel nacional, no se cuenta con una metodología analítica oficial para la determinación de la solubilidad de los fertilizantes fosfatados inorgánicos, por lo que es necesario validar e implementar métodos analíticos adecuados, confiables y sensibles.

La implementación de las metodologías de solubilidad para determinar el P soluble en fertilizantes fosfatados, por medio de la extracción con solución de citrato de amonio neutro a pH 7,0; con solución de ácido cítrico al 2% y con agua, se realizó a través de la adaptación de los protocolos oficiales de análisis del International Fertilizer Development Center (IFDC, 2007) y de la Association of Official Analytical Chemists International (AOAC, 2007), con la colaboración del Sr. Norman Chien, Ph.D., USA.

La composición química nos indica la concentración de nutrientes esenciales del fertilizante.

En general, la aplicación de fertilizantes fosfatados que contienen una alta concentración de un nutriente esencial pueden disminuir los costos asociados a su transporte y aplicación al suelo, presentando mayores ventajas económicas que los fertilizantes fosfatados con baja concentración de este nutriente esencial.

De acuerdo a los resultados obtenidos del estudio de los fertilizantes fosfatados usados actualmente en praderas de la zona sur del país, se ha podido establecer que estos pueden presentar importantes diferencias en la concentración de P total en relación a la concentración reportadas en las etiquetas de los fertilizantes fosfatados.

La reacción química del fertilizante en la solución del suelo dice relación con su efecto en el pH del suelo.

Las rocas fosfóricas presentan una gran área específica que sumado a los procesos edafoclimáticos de los suelos volcánicos, cuya acidez natural posibilita una mayor difusión del P en el suelo, generan un efecto potencial de "arranque" sobre el crecimiento y producción de cultivos y praderas.

Además, del aporte de P contribuyen al incremento del Ca intercambiable. Sin embargo, las dosis de aplicación de RF (100 a 200 kg ha⁻¹) presentan un efecto de encalado de baja importancia (FAO, 2007); debido a que su valor neutralizante efectivo es de 50%, lo cual equivale a un aporte de 50-100 kg cal ha⁻¹.

La aplicación de los fertilizantes fosfatados al suelo genera varias reacciones químicas en él, las cuales dependerán de los siguientes factores:

- i) Características físicas y químicas del suelo y,**
- ii) Características químicas del fertilizante fosfatado.**

Cuando se aplican fertilizantes fosfatados solubles, éste rápidamente se disuelve al estar en contacto con el suelo húmedo y pasa desde la solución del suelo a formar parte de la fracción de P lábil (Ecuación 1).



Posteriormente, continúan reacciones de precipitación y adsorción con los óxidos de hierro y óxidos de aluminio formando, a través del tiempo, compuestos fosfatados menos solubles (fracción de P no lábil) que limitan el suministro de P disponible para los cultivos y praderas.

Sin embargo, a través de procesos químicos y biológicos tanto del suelo como de la planta se puede transformar en P disponible para ser absorbido por las plantas.

En cambio, cuando se aplican fertilizantes fosfatados insolubles, éstos deben ser disueltos por la solución ácida (protones, H⁺) generada en forma natural en los suelos (Ecuación 2), razón por la cual éste tipo de fertilizante es recomendado para suelos ácidos (pH agua < 5,8).



Posteriormente, en el fertilizante fosfatado insoluble continúan las mismas reacciones de precipitación y adsorción mencionadas anteriormente para los fertilizantes fosfatados solubles.

Cuando se aplica un fertilizante fosfatado, a largo plazo, el P disuelto reacciona con el suelo disminuyendo el P en solución. Este proceso se conoce como fijación o retención de P en el suelo, en el cual se incluyen los siguientes procesos:

- a) Precipitación de P como fosfato de hierro, aluminio y calcio,**
- b) Adsorción de fosfato en los coloides del suelo e,**
- c) Inmovilización de fosfato en la materia orgánica del suelo. Sin embargo, a través de procesos químicos y biológicos del suelo y de la planta, se transforma en P disponible para las plantas.**

La deficiencia de P de los suelos volcánicos es la razón por la cual se requieren de cantidades importantes de fertilizante fosfatado, que son necesarias para aumentar el P en la solución del suelo para ser absorbido por cultivos y praderas, particularmente en las etapas iniciales de su crecimiento y desarrollo.

5.1. Evaluación de la solubilidad y composición química de fertilizantes fosfatados

5.1.1 Materiales y métodos

Se adquirieron 27 fertilizantes fosfatados (n=3) y 2 fertilizantes de otras fuentes (n=3) a diferentes proveedores de insumos agrícolas de la Región de Los Lagos (Figura 12).

De este total, diez correspondieron a fertilizantes fosfatados solubles simples (fosfato monoamónico, FMA; fosfato diamónico, FDA y superfosfato triple, SFT), catorce a fertilizantes fosfatados solubles compuestos (mezclas, MZ), tres a fertilizantes fosfatados insolubles (roca fosfórica, RF) y otras fuentes (sustrato mineral, SM; guano rojo, GR).

Cada saco fue homogenizado, cuarteado y eliminados los cuartos opuestos una y otra vez hasta tener una muestra representativa y homogénea que fue guardada en un contenedor plástico hasta su análisis. Cada muestra fue molida en un molinillo y tamizada a 147 μm (Figura 13), según los procedimientos oficiales del IFDC (2007).

Posteriormente, se determinó la humedad de cada muestra de fertilizante fosfatado, según la adaptación de las metodologías oficiales propuestas por AOAC (2007).

Finalmente, se determinaron los índices de solubilidad en agua, en solución de ácido cítrico al 2% y en solución de citrato de amonio neutro a pH 7,0 en los fertilizantes evaluados, de acuerdo a las metodologías adaptadas de los protocolos oficiales de IFDC (2007) y AOAC (2007) que fue expresado como porcentaje P_2O_5 total del fertilizante.

Una submuestra de 0,4 kg de cada fertilizante fosfatado fue enviada a un laboratorio externo autorizado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) para determinar las concentraciones totales de P y metales pesados (cromo, Cr; selenio, Se; plomo, Pb; arsénico, As; cadmio, Cd y mercurio, Hg) según Standard Methods (2005).

Los resultados obtenidos de la concentración de metales pesados de la caracterización química de los fertilizantes fosfatados fueron expresados como mg kg^{-1} fertilizante.

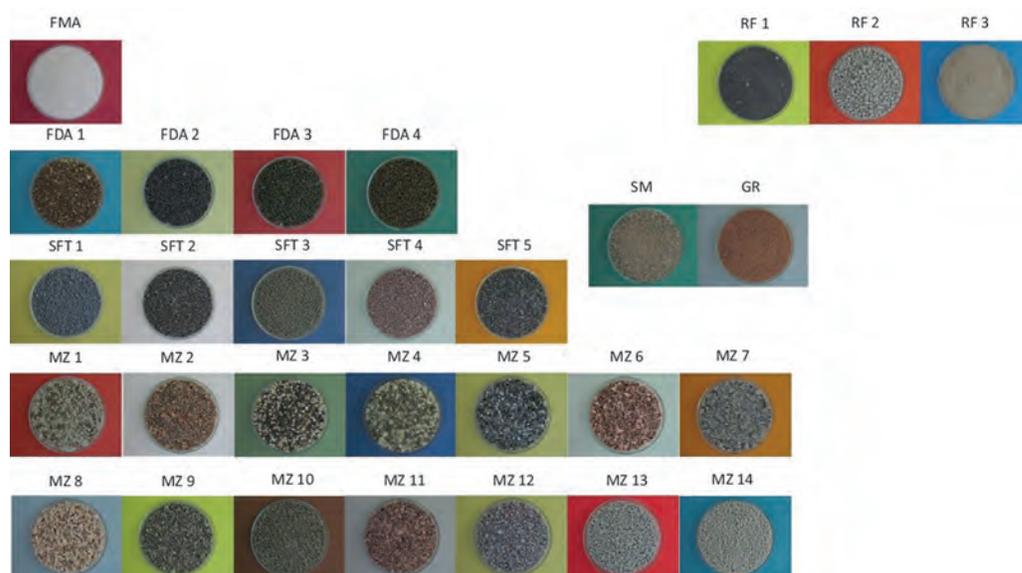


Figura 12. Fertilizantes fosfatados comerciales y otros fertilizantes evaluados.



Figura 13. Preparación de las muestras de fertilizantes fosfatados comerciales evaluadas.

5.1.2 Resultados

En base a técnicas validadas por INIA Remehue para evaluar la efectividad potencial de los fertilizantes fosfatados usados actualmente en praderas de la zona sur, se ha podido establecer que estos pueden presentar importantes diferencias en los rangos de índices de solubilidad (Cuadro 3) de acuerdo al porcentaje de P total que es soluble en diferentes soluciones extractantes y, que se expresa, por razones prácticas, como porcentaje de la concentración de P_2O_5 total.

Los resultados obtenidos de los índices de solubilidad en agua de los fertilizantes fosfatos solubles simples (FMA, FDA y SFT) y de los fertilizantes fosfatados solubles compuestos (MZ) fluctuaron entre 65 a 100% del total de P_2O_5 .

En cambio, los índices de solubilidad en solución de ácido cítrico al 2% de los fertilizantes fosfatados solubles simples, fertilizantes fosfatados solubles compuestos y fertilizantes fosfatados insolubles fluctuaron entre 75% a 100%; 85% a 100% y 18% a 53% del total de P_2O_5 , respectivamente.

Por su parte, los índices de solubilidad en solución de citrato de amonio neutro a pH 7,0 de los fertilizantes fosfatados solubles simples, fertilizantes fosfatados solubles compuestos y fertilizantes fosfatados insolubles fluctuaron entre 16% a 46%, 30% a 100% y 1% a 30% del total de P_2O_5 , respectivamente.

En general, los índices de solubilidad en solución de ácido cítrico al 2% y en solución de citrato de amonio neutro a pH 7,0 obtenidas para los fertilizantes fosfatados insolubles coinciden con lo informado por Besoain *et al.* (1999b).

Cuadro 3. Solubilidad de fertilizantes fosfatados comerciales y otros fertilizantes evaluados (\pm error estándar, n=3).

	Índice de solubilidad (% P_2O_5 total)								
	Agua			Citrato de amonio neutro a pH 7,0			Ácido cítrico al 2%		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
Fertilizantes fosfatados solubles									
FMA (1*)	100 \pm 0,1	100	100	37 \pm 3,8	31	44	99 \pm 0,5	98	100
FDA (4*)	98 \pm 0,6	95	100	35 \pm 1,8	28	46	98 \pm 1,0	92	100
SFT (5*)	86 \pm 2,6	66	100	23 \pm 1,5	16	34	92 \pm 1,8	75	100
MZ (14*)	84 \pm 1,5	65	100	53 \pm 2,7	30	100	97 \pm 0,7	85	100
Fertilizantes fosfatados insolubles									
RF (3*)	0	0	0	9 \pm 2,7	1	30	45 \pm 3,8	18	53
Otros fertilizantes									
SM (1*)	100 \pm 0,0	100	100	88 \pm 8,0	73	100	100 \pm 0,0	100	100
GR (1*)	5 \pm 0,2	5	5	54 \pm 1,6	52	58	100 \pm 0,0	100	100

*(Número de fertilizantes evaluados por cada tipo). Fosfato Monoamónico (FMA), Fosfato Diamónico (FDA), Superfosfato Triple (SFT), Sustrato Mineral (SM), Guano Rojo (GR).

¿Cuál es el objetivo de conocer la solubilidad de un fertilizante fosfatado?

Si un agricultor aplicará una dosis de 150 kilos de P_2O_5 ha^{-1} usando un fertilizante fosfatado soluble (como SFT), que de acuerdo a nuestros resultados (Cuadro 3) presenta una solubilidad en agua del 66%, esto significa que 99 kg de P_2O_5 de este fertilizante fosfatado son solubles en agua y 51 kilos de P_2O_5 son insolubles. Por lo tanto, el agricultor deberá corregir esta dosis a 227 kg de P_2O_5 ha^{-1} de este fertilizante fosfatado con el objeto de aplicar una dosis 100% soluble. Lo anterior, implica un costo extra de \$23.886 por hectárea.

El P_2O_5 soluble en agua está inmediatamente disponible para el crecimiento del cultivo y/o pradera, mientras que la fracción insoluble en agua permanecerá en el suelo hasta los procesos de químicos y biológicos tanto del suelo como de la planta, lo transformen en P soluble y disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas.

Cuadro 4. Concentración de fósforo total en los fertilizantes fosfatados y otros fertilizantes evaluados (\pm error estándar, n=3).

	P ₂ O ₅ (%)		
	Promedio	Mínimo	Máximo
Fertilizantes fosfatados solubles			
FMA	39,6 \pm 11,13	27,9	61,8
FDA	42,1 \pm 2,32	28,2	49,2
SFT	46,6 \pm 1,07	40,3	56,3
MZ	23,0 \pm 1,79	1,0	48,4
Fertilizantes fosfatados insolubles			
RF	21,9 \pm 2,15	14,2	29,8
Otros fertilizantes			
SM	0,1 \pm 0,00	0,1	0,1
GR	5,5 \pm 0,02	5,5	5,5

Fosfato Monoamónico (FMA), Fosfato Diamónico (FDA), Superfosfato Triple (SFT), Sustrato Mineral (SM), Guano Rojo (GR).

De acuerdo a lo anterior, debemos estar informados tanto de la solubilidad como de la concentración de P que pueden presentar las diferentes alternativas de fertilizante fosfatado disponible en el mercado y, que en definitiva se traduzca en el menor costo por unidad de P posible con el objetivo de suministrar este macronutriente de acuerdo a los requerimientos de las diferentes cultivos y especies pratenses, que necesitan de un continuo aporte de P a través de su ciclo vegetativo.

Las concentraciones de P₂O₅ de FMA, FDA, SFT, MZ y RF fluctuaron entre 28-62%, 28-49%, 40-56%, 1-48% y 14-30% respectivamente. Al contrastar esta información con la concentración estándar del FMA (50% P₂O₅), FDA (46% P₂O₅) y SFT (46% P₂O₅), podemos indicar que el FMA se encuentra dentro de los estándares de concentración, sin embargo, el 50% de los FDA y el 50% de los SFT se encuentran bajo la concentración estándar (Cuadro 4).

Las concentraciones de Cr, Se, Pb, As y Cd de los fertilizantes fosfatados evaluados fluctuaron entre 30 a 640 mg kg⁻¹; 0,51 a 0,63 mg kg⁻¹; 0,6 a 21 mg kg⁻¹; 0,5 a 119 mg kg⁻¹ y 0,7 a 49 mg kg⁻¹, respectivamente (Cuadro 5), corroborando estudios realizados por Molina *et al.*, (2009) quienes indican que FMA, FDA y SFT presentaron concentraciones que fluctuaron entre 79 a 924 mg kg⁻¹ de Cr; 3,8 a 22,3 mg kg⁻¹ de Pb; 8,3 a 19,7 mg kg⁻¹ de As; 2,6 a 57,9 mg kg⁻¹ de Cd; 1,5 a 155 mg kg⁻¹ de Cu; 1,8 a 17,9 mg kg⁻¹ de Ni; 29,6 a 698 mg kg⁻¹ de V y 28,6 a 883 mg kg⁻¹ de Zn.

Junto con la aplicación de fertilizantes fosfatados se aplican metales pesados que forman parte de la materia prima de estos fertilizantes. Si consideramos un fertilizante fosfatado con las siguientes concentraciones: 46% P₂O₅, 22 mg kg⁻¹ de As y 49 mg kg⁻¹

de Cd. Esto implica que por cada kg de P_2O_5 se estarían aplicando 48 mg As y 107 mg Cd, valores considerados altos según la Asociación Americana de Control Oficial de Alimentos Vegetales (APFCO, 2003) quienes recomiendan límites de 13 mg As y 10 mg Cd por kg de P_2O_5 aplicado.

El Cd es el metal pesado más investigado; debido a su toxicidad potencialmente alta para la salud humana en los alimentos derivados de cultivos tratados con fertilizantes fosfatados que presentan una concentración importante de Cd. La mayoría de los estudios sobre la absorción de Cd por los cultivos han utilizado fertilizantes fosfatados solubles, sin embargo, la reacción del Cd en suelos fertilizados con RF difiere de los fertilizantes fosfatados solubles; debido a que el Cd ligado a la apatita en la RF es insoluble en agua (FAO, 2007).

Estudios realizados por Iretskaya *et al.* (1998) indican que la RF Carolina del Norte (47 mg Cd kg^{-1}) fue tan efectiva en aumentar el rendimiento de arroz de secano como el SFT producido de la misma RF pero la concentración de Cd en el arroz con el tratamiento de RF fue la mitad que con el tratamiento de SFT.

Desde otro punto de vista, estudios realizados por el Consorcio Lechero (2011, comunicación personal) indican que suelos bajo pradera (IV a X Regiones) presentaron concentraciones de As y Cd que fluctuaron entre 0,01–2,9 mg kg^{-1} y 0,02–0,16 mg kg^{-1} , respectivamente. Lo cual implica que un suelo Trumao (estrata 0–10 cm) puede contener en forma natural entre 6,8–1.972 mg As ha^{-1} y entre 13,6–108,8 mg Cd ha^{-1} . Si consideramos una dosis de 100 kg P_2O_5 ha^{-1} $año^{-1}$ estamos aplicando, a este suelo, 4.800 mg ha^{-1} $año^{-1}$ de As y 10.700 mg ha^{-1} $año^{-1}$ de Cd, que se suman a la concentración basal de As y Cd del suelo Trumao.

Los suelos en forma natural presentan concentraciones de metales pesados (concentración basal) producto de su material parental y de los procesos edafoclimáticos (Adriano, 2001).

Los aportes antropogénicos de la aplicación de metales pesados a través de los fertilizantes fosfatados, se suman a la concentración basal generando cambios en el estado de equilibrio original. Los metales pesados no se degradan, sin embargo, se pueden acumular y lixiviar en suelos agrícolas, lo cual trae implicancias en la calidad del suelo, procesos microbianos y transferencia hacia cadenas tróficas. Debido a este potencial impacto de contaminación es relevante determinar los valores umbrales de metales pesados en los suelos agrícolas del país.

Estudios realizados en Nueva Zelanda, indican que praderas bajo pastoreo de ganado de leche y carne presentan una concentración que fluctúa entre 0 – 2,52 ug g^{-1} de Cd y 0,04 – 1,40 ug g^{-1} de Cd, respectivamente (Taylor *et al.*, 2007) y, que la aplicación por 44 años de 173 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de P_2O_5 acumularon 7,8 g ha^{-1} $año^{-1}$ de Cd (Gray *et al.*, 1999).

Cuadro 5. Concentración de metales pesados en los fertilizantes evaluados (\pm error estándar, n=3).

	Cr			Se			Pb (mg kg ⁻¹)			As			Cd		Hg
	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	
Fertilizantes fosfatados solubles															
FMA	*	*	*	*	*	*	*	*	*	63,8±2,35	60,0	68,1	*	*	*
FDA	217±11,2	160	290	0,55±0,00	0,54	0,56	0,6±0,01	0,6	0,7	1,5±0,25	0,5	2,3	8,7±0,24	7,4	9,7
SFT	293±53,5	30	640	0,56±0,02	0,51	0,63	1,1±2,55	2,1	21,3	7,3±2,17	1,3	21,9	21,6±5,06	1,1	49,0
MZ	80±7,2	30	170	*	*	*	2,1±0,38	0,6	9,0	11,0±1,90	2,1	48,4	3,4±0,26	0,9	6,9
Fertilizantes fosfatados insolubles															
RF	123±18,7	50	220	*	*	*	5,5±0,10	5,2	5,8	32,5±14,88	1,0	119,0	3,8±1,42	0,7	10,4
Otros fertilizantes															
SM	120±15,3	100	150	*	*	*	1,0±0,03	1,0	1,1	7,4±0,02	7,4	7,5	*	*	*
GR	20±0,0	20	20	*	*	*	*	*	*	5,8±0,03	5,7	5,8	1,1±0,03	1,0	1,1

Fosfato Monoamónico (FMA), Fosfato Diamónico (FDA), Superfosfato Triple (SFT), Sustrato Mineral (SM), Guano Rojo (GR).

* Valores por debajo del límite de detección.

Capítulo 6

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MANTENCIÓN EN UNA PRADERA PERMANENTE



6.1 Evaluación de la fertilización fosfatada de mantención en una pradera permanente

Se estableció un ensayo de campo, en INIA Remehue, sobre un Andisol (Serie Osorno) con alto nivel de P disponible (P Olsen inicial, estrata 0-10 cm: 23 ppm o mg kg^{-1}) con la finalidad de evaluar la efectividad de diferentes dosis de P_2O_5 ha^{-1} de fertilizante fosfatado de mantención en una pradera permanente.

6.1.1 Materiales y métodos

Los datos meteorológicos de precipitación, temperatura del aire y temperatura del suelo, fueron colectados en la estación meteorológica automática (Red Agrometeorológica Agromet-INIA) cercana al sitio experimental. Se calcularon tanto los promedios históricos mensuales como los promedios actuales, los cuales fueron utilizados para analizar los resultados del ensayo de campo.

Previo al establecimiento del ensayo de campo, se realizó un análisis de suelo para determinar sus propiedades químicas (materia orgánica, pH en agua y en CaCl_2 , macronutrientes, micronutrientes, Al intercambiable y saturación de Al; Sadzawka *et al.*, 2006) y definir la fertilidad inicial del suelo (Cuadro 8, año 1 y Cuadro 9, año 2).

En base a estos resultados, se estimaron las dosis de P_2O_5 correspondiente a los tratamientos y fertilización base del año 1 (Cuadro 6) y de la fertilización base del año 2 (Cuadro 7) del ensayo de campo, distribuido en un diseño experimental de bloques completos al azar ($n= 3$, parcelas de 9 m^2).

Cuadro 6. Nutrientes aplicados en el ensayo de campo de Remehue al año 1.

Nutriente	Dosis (kg ha^{-1})	Fuente
P_2O_5	0, 50, 100, 150 y 200	RF (%28,9 P_2O_5), SFT (%45 P_2O_5)
N*	120	Urea (%46 N)
K_2O	150	Sulpomag (%22 K_2O), KCl (%60 K_2O)
MgO	40	Sulpomag (%18 MgO)
S	40	Sulpomag (%22 S)

*Aplicado en tres parcialidades.

Cuadro 7. Nutrientes aplicados en el ensayo de campo de Remehue al año 2.

Nutriente	Dosis (kg ha^{-1})	Fuente
N*	120	Urea (46% N)
K_2O	120	Sulpomag (22% K_2O), KCl (60% K_2O)
CaCO_3	1.200	Cal (44% Ca)
MgO	40	Sulpomag (18% MgO)
S	50	Sulpomag (22% S)

*Aplicado en tres parcialidades.

6.1.2 Manejos del ensayo de campo

Se realizó un corte de limpieza para emparejar la altura de la pradera, luego se aplicaron las dosis de P_2O_5 ha^{-1} correspondiente a los tratamientos de fertilización fosfatada y de fertilización base, en forma manual.

El control de malezas de hoja ancha se realizó con los siguientes herbicidas: Tordón 24K ($1\text{ l }ha^{-1}$) y DMA6 SL ($1\text{ l }ha^{-1}$).

Además, en el control de insectos, se controlaron cuncunilla negra (*Dalaca palens*) con Karate ($200\text{ cc }ha^{-1}$) y gusano blanco (*Phytoloema hermanni*) con hongos entomopatógenos (*Beauveria bassiana*, cepa Qu-B931 y *Metarhizium anisopliae*, cepa Qu M270, respectivamente, dosis: $1.012\text{ esporas }ha^{-1}$).

6.1.3 Análisis

Se realizaron cortes de forraje con barra segadora y máquina de cortar pasto cada vez que la pradera permanente alcanzó aproximadamente 20 cm de altura (Figura 14), dejando un residuo de 5 cm.

Se registró la producción de materia verde total por parcela y una muestra de 200 g de cada parcela fue secada en horno de ventilación forzada a $60^{\circ}C$ hasta peso constante (Sadzawka *et al.*, 2007) para determinar la producción de materia seca (MS).

Parte de la muestra de MS fue procesada en un molinillo (tamiz 2 mm) para su análisis bromatológico a través de su composición mineral (P y N foliar) y calidad nutritiva (proteína cruda, PC y energía metabolizable, EM) según las metodologías descritas por Sadzawka *et al.* (2007). Los datos obtenidos fueron comparados con patrones estimados normales en una pradera permanente.

La absorción de P de la pradera evaluada se determinó en base a la producción de MS y la concentración de P foliar.

Al final del período de evaluación del ensayo de campo, se colectaron muestras de suelo y se determinó la concentración de P disponible a través de las metodologías de la resina de intercambio iónico (P Resina, Saggat *et al.*, 1990 y 1992) y método Olsen (P Olsen, Sadzawka *et al.*, 2006).

Los datos obtenidos fueron analizados con un software estadístico (SAS y Statistica 7) a través de un análisis de varianza (ANDEVA) y separación de medias (Test de Tukey o Test de Fischer, $p < 0,05$).

Cuando correspondió las relaciones entre los resultados obtenidos se obtuvieron a través de correlaciones de Pearson y regresión lineal.



Figura 14. Procedimiento de corte de forraje en los diferentes ensayos de campo.

6.1.4 Resultados

6.1.4.1 Caracterización climática de la localidad de Remehue durante el período experimental 2013-2015

En la Figura 15, se presentan promedios históricos (39 años) y promedios actuales de precipitación diaria y temperaturas medias (aire y suelo) durante el período de ejecución del ensayo de campo.

Los promedios históricos de precipitación acumulada, temperatura del aire y temperatura del suelo fueron de 1.215 mm; 11,2°C y 12,6°C; respectivamente (Figura 15a).

Los meses más secos, fríos y cálidos correspondieron a enero y marzo, junio-julio y enero-febrero, respectivamente.

La precipitación acumulada, temperatura del aire y temperatura del suelo, en el sitio experimental de Remehue, fueron de 1.174 mm; 10,8°C y 12,1°C; respectivamente (Figura 15b).

En la Figura 15, se observa que la precipitación actual de la localidad de Remehue fue menor a su promedio histórico durante gran parte del período experimental, con excepción de los meses de junio 2014, septiembre 2014, julio 2015 y agosto 2015.

Los meses más secos fluctuaron entre diciembre a marzo, coincidiendo con el período de sequía estival de la localidad de Remehue. Este déficit de precipitaciones afectó el adecuado suministro de agua, lo cual deprimió el crecimiento normal de las especies pratenses, afectando la productividad de MS de la pradera permanente evaluada.

El período en que la temperatura del suelo fue < 10°C fluctuó entre los meses de junio a septiembre (Figura 15b).

6.1.4.2 Caracterización de las propiedades químicas del sitio experimental en Remehue

En los Cuadros 8 y 9, se presenta el nivel de fertilidad inicial del suelo Osorno de la localidad de Remehue y el nivel de fertilidad después de un año de aplicados los tratamientos, respectivamente. El suelo, presentó concentraciones alta de P y media de S.

Su reacción es moderadamente ácida y la concentración de materia orgánica es media. Las concentraciones de la suma de bases intercambiables y del Al intercambiable fueron media a baja y media, respectivamente y, por ende, la saturación de Al fue moderada.

En general, el suelo presentó un buen nivel de fertilidad (Cuadros 8 y 9), sin limitaciones de acidificación (parámetros de acidez) ni deficiencias nutricionales para el normal crecimiento de las especies pratenses de la pradera permanente evaluada.

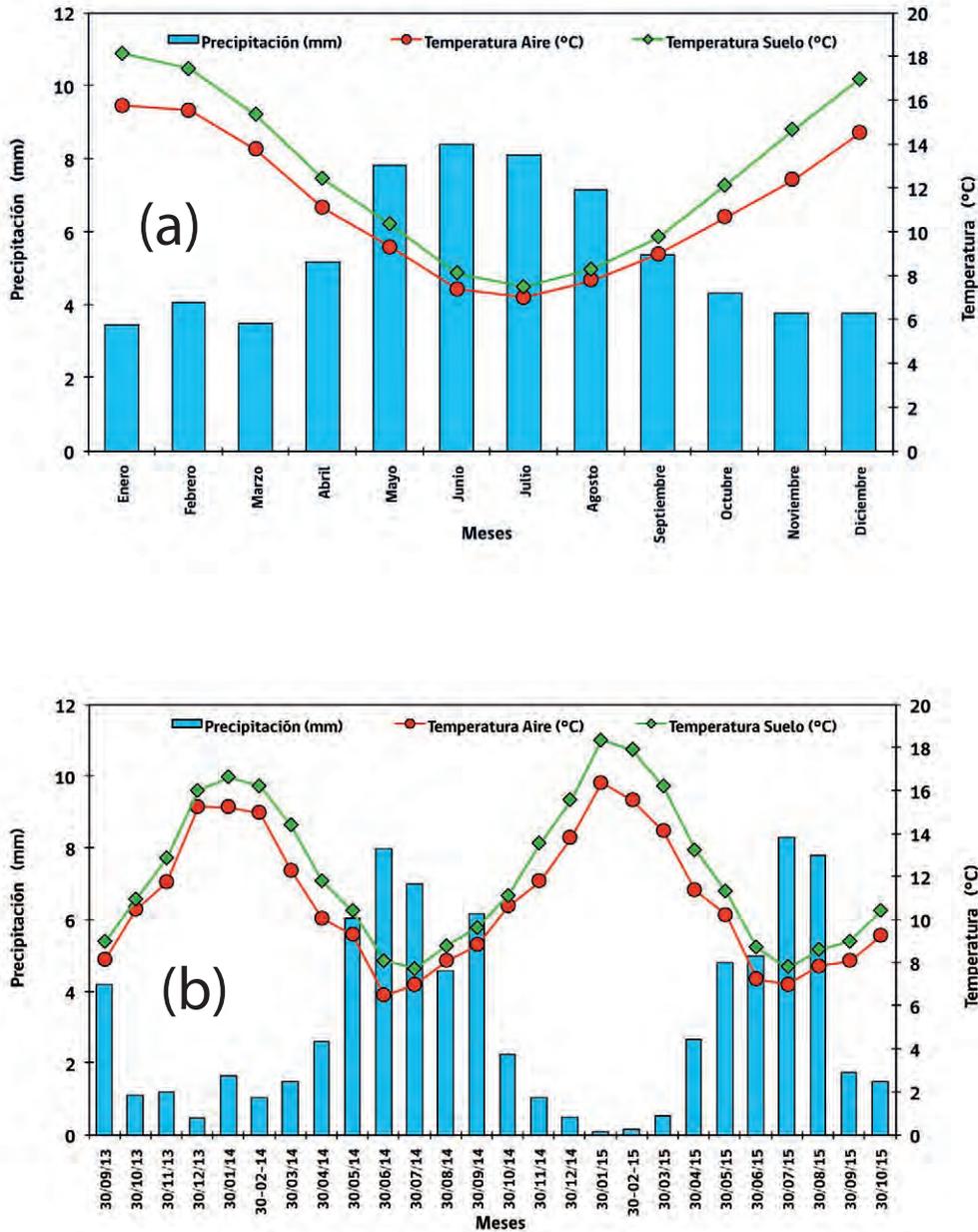


Figura 15. Promedios históricos (a) y promedios actuales (b) de precipitación diaria y temperaturas medias (aire y suelo) durante el período de ejecución del ensayo de campo en el sitio experimental de Remehue.

Cuadro 8. Caracterización química inicial del sitio experimental en Remehue, estrata 0-10 cm (\pm error estándar, n=3). Fecha: 28/08/13.

Parámetro		Parámetro	
pH H ₂ O	5,8 \pm 0,03	Al int. (cmol(+) kg ⁻¹)	0,3 \pm 0,05
pH CaCl ₂	4,8 \pm 0,04	Saturación Al (%)	4,2 \pm 0,90
Materia orgánica (%)	14 \pm 0,5	Boro (mg kg ⁻¹)	0,5 \pm 0,06
P Olsen (mg kg ⁻¹)	23 \pm 1,2	Hierro (mg kg ⁻¹)	104 \pm 3,2
N disponible (mg kg ⁻¹)	19 \pm 2,8	Manganeso (mg kg ⁻¹)	24,8 \pm 2,99
S (mg kg ⁻¹)	15 \pm 3,8	Cobre (mg kg ⁻¹)	4,1 \pm 0,05
Suma Bases (cmol(+) kg ⁻¹)	6,0 \pm 0,27	Zinc (mg kg ⁻¹)	1,4 \pm 0,14

Cuadro 9. Caracterización química al año 2 del sitio experimental en Remehue, estrata 0-10 cm (\pm error estándar, n=3). Fecha: 02/09/14.

Parámetro		Parámetro	
pH H ₂ O	5,6 \pm 0,02	Saturación Al (%)	5,6 \pm 0,86
pH CaCl ₂	4,8 \pm 0,01	Boro (mg kg ⁻¹)	0,5 \pm 0,09
Materia orgánica (%)	15 \pm 0,3	Hierro (mg kg ⁻¹)	89 \pm 19,7
N disponible (mg kg ⁻¹)	44 \pm 1,7	Manganeso (mg kg ⁻¹)	28,4 \pm 0,80
S (mg kg ⁻¹)	15 \pm 0,5	Cobre (mg kg ⁻¹)	4,7 \pm 0,11
Suma Bases (cmol(+) kg ⁻¹)	5,5 \pm 0,27	Zinc (mg kg ⁻¹)	1,6 \pm 0,09
Al int. (cmol(+) kg ⁻¹)	0,3 \pm 0,01		

6.1.4.3 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera permanente

En la Figura 16, se presenta el efecto de los tratamientos sobre la producción acumulada de materia seca (MS) en la pradera permanente, durante el periodo de ejecución del ensayo de campo en Remehue (septiembre 2013 a octubre 2015, 12 cortes).

La producción acumulada de MS en el año 1, año 2 y total (año 1 + año 2) fue significativamente ($p < 0,05$; Figura 16) afectada por la dosis de P₂O₅, la época de corte y por la interacción de ambos factores. Además, se determinó que la producción acumulada de MS no fue afectada ($p > 0,05$; Figura 16) por el tipo de fertilizante fosfatado.

La interacción significativa indicó que las respuestas en MS frente a la fertilización fosfatada varían según la época de corte, asociada a las condiciones climáticas; debido a la falta de humedad entre los meses de diciembre a marzo y bajas temperaturas entre los meses de junio a septiembre (Figura 15b).

La producción acumulada de MS correspondiente al año 1 (1° al 6° corte, Figura 15) fue significativamente ($p < 0,05$) mayor con la dosis de 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ (9,6 \pm 0,20 t MS ha⁻¹

con RF y $10,3 \pm 0,35$ t MS ha⁻¹ con SFT) y menor en el tratamiento control (sin P) con $6,4 \pm 0,38$ t MS ha⁻¹.

Los demás tratamientos también fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$) y presentaron el siguiente orden decreciente: $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 50 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, independiente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

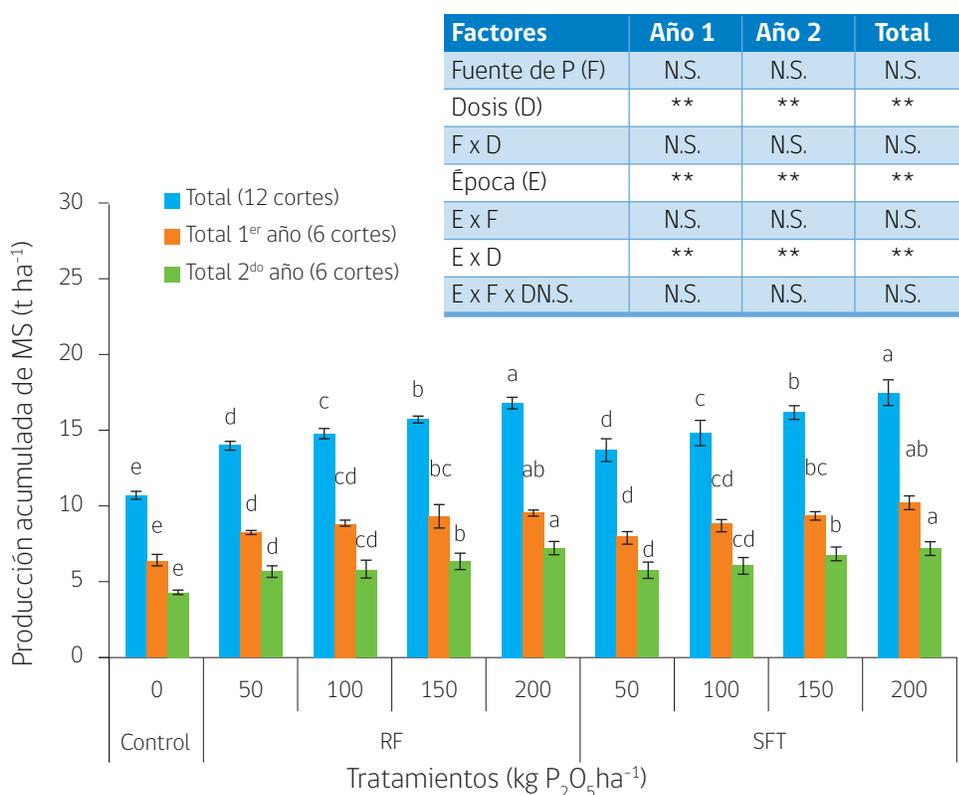


Figura 16. Efecto de la fertilización fosfatada de mantenimiento usando dos fuentes de fósforo sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera permanente. Localidad: Remehue. Período: septiembre 2013 a octubre 2015. (\pm error estándar, n=3). Letras diferentes indican diferencias entre dosis de fertilización, obtenidas con el test de Fischer ($p < 0,05$).

Tanto la RF como el SFT generaron aumentos de la producción acumulada de MS en el año 1 (Figura 17), en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 30% a 50% y 25% a 62%, respectivamente.

La producción acumulada de MS en el año 2 (7^o al 12^o corte, Figura 16) fue menor a la generada en el año 1 por efecto climático (déficit hídrico) independientemente del tratamiento y tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

Sin embargo, la respuesta de la pradera permanente a la aplicación de las diferentes dosis de P_2O_5 ha^{-1} fue estadísticamente diferente entre sí ($p < 0,05$), siendo menor en el tratamiento control ($4,3 \pm 0,15$ t MS ha^{-1}) y mayor con la dosis 200 kg P_2O_5 ha^{-1} fluctuando entre $7,2 \pm 0,46$ t MS ha^{-1} con SFT y $7,3 \pm 0,36$ t MS ha^{-1} con RF. Los demás tratamientos presentaron el siguiente orden decreciente: 150 kg P_2O_5 ha^{-1} > 100 kg P_2O_5 ha^{-1} > 50 kg P_2O_5 ha^{-1} , independiente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

Ambos fertilizantes fosfatados, RF y SFT, generaron aumentos en la producción acumulada de MS en el año 2 (Figura 17), en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 32% a 69% y 33% a 66%, respectivamente.

La producción acumula total de MS (1° al 12° corte, Figura 16) del período de ejecución del ensayo de campo (septiembre 2013 a octubre 2015) fue significativamente ($p < 0,05$) mayor con la dosis 200 kg P_2O_5 ha^{-1} generando $16,9 \pm 0,28$ t MS ha^{-1} con RF a $17,6 \pm 0,81$ t MS ha^{-1} con SFT, en cambio, se alcanzaron sólo $10,7 \pm 0,24$ t MS ha^{-1} con el tratamiento control (sin P).

Los demás tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$) y siguieron el orden decreciente: 150 kg P_2O_5 ha^{-1} > 100 kg P_2O_5 ha^{-1} > 50 kg P_2O_5 ha^{-1} .

La aplicación de RF y SFT generaron aumentos de la producción acumulada total de MS, en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 31% a 57% y 28% a 63%, respectivamente (Figura 17).

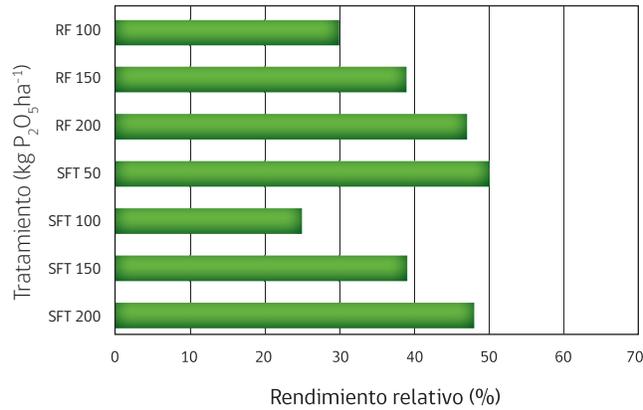
La aplicación de las diferentes dosis de P_2O_5 aumentó la producción de la pradera permanente en ambos años, donde las mayores dosis de P_2O_5 presentaron la mayor producción de MS (Figura 15).

La producción de MS de la pradera permanente fue mayor el época estival (diciembre-enero-febrero) que en la época invernal (junio-julio-agosto); debido a que la baja temperatura invernal de esta localidad (Figura 15b) afectó el normal crecimiento y desarrollo de la pradera permanente.

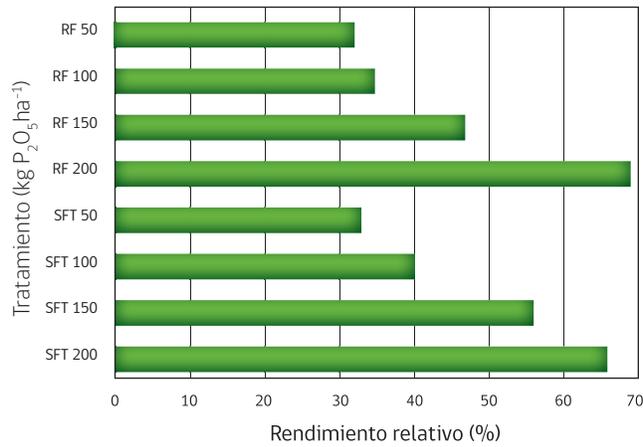
Sin embargo, la producción de forraje fue menor durante el año 2 en comparación con el año 1, por lo que no se registró ningún efecto acumulativo de la aplicación de dosis de P_2O_5 en el tiempo. Cabe señalar que la menor producción se debe a problemas climáticos.

En general, los tratamientos a igual dosis de P_2O_5 generaron similares producciones de MS en la pradera permanente, estos resultados sugieren que el fertilizante fosfatado insoluble (RF) puede reemplazar al fertilizante fosfatado soluble (SFT) en la fertilización fosfatada de mantención de praderas de la zona sur.

Año 1



Año 2



**Total
(año 1 + año 2)**

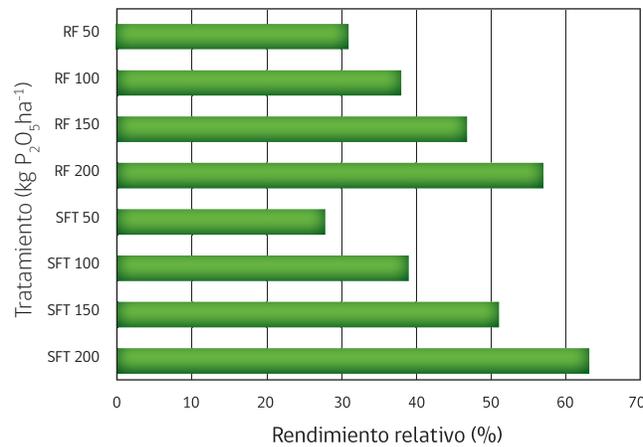


Figura 17. Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en el rendimiento relativo de producción acumulada de materia seca en una pradera permanente. Localidad: Remehue.

6.1.4.4 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en la concentración foliar de fósforo

El efecto de los tratamientos en la respuesta de la pradera permanente no fue significativo en la concentración foliar de P ($p > 0,05$; Figura 18).

En la Figura 18, podemos observar que la concentración foliar de P durante el período evaluado (septiembre 2013 a octubre 2015), fluctuó entre 1,5 a 4,3 g kg⁻¹ con los diferentes tratamientos de fertilización fosfatada. Estos rangos se encuentran dentro del rango normal a alto de P en praderas permanentes fertilizadas de Osorno (1,5 a 3,7 g kg⁻¹), reportados por Anrique *et al.* (2008).

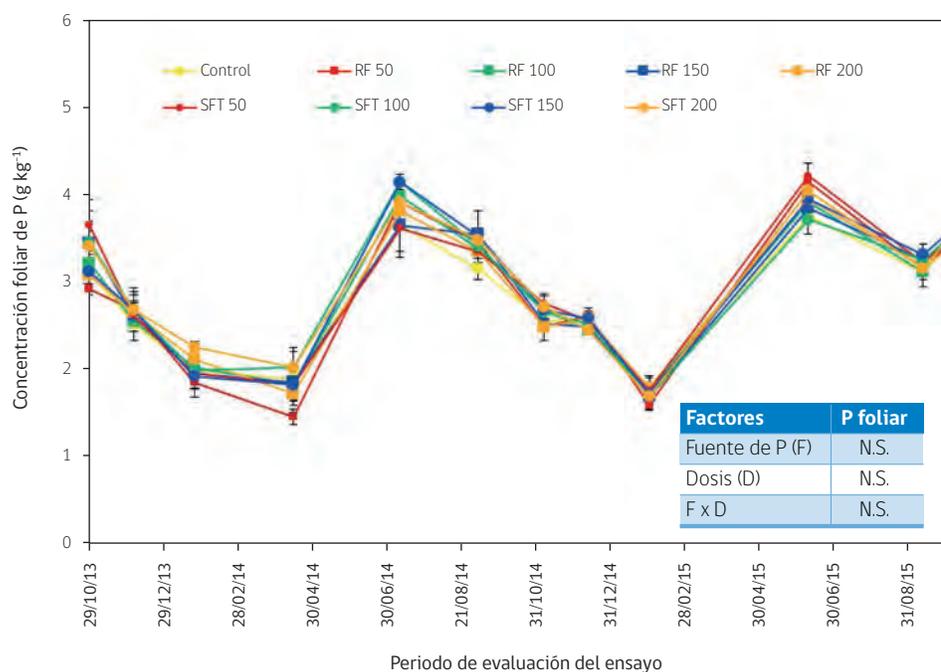


Figura 18. Efecto de la interacción tratamiento y momento de corte sobre la concentración foliar de fósforo en una pradera permanente en Remehue. Período: septiembre 2013 a octubre 2015.

La concentración foliar de P mostró variaciones estacionales con los diferentes tratamientos aplicados (Figura 18).

En el año 1, independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado, sólo en verano e invierno puede suministrar el P necesario de requerimiento de la pradera permanente. En cambio, en el año 2, los límites de requerimiento se reducen a la primavera.

Por otro lado, considerando los requerimientos de ballica y trébol (Benton *et al.*, 1991), los tratamientos con las dosis más altas de RF y SFT en primavera e invierno del año 1 y, todos los tratamientos en otoño e invierno del año 2 se traducen en suministros suficientes de P foliar (Figura 18).

Con estos resultados se puede generar información sobre los períodos de suplementación con P del ganado alimentado en base a praderas permanentes fertilizadas con dosis de P_2O_5 ha^{-1} de mantención, evitando trastornos nutricionales y, por ende, efectos detrimentales en la producción de carne y/o leche.

6.1.4.5 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en la calidad nutritiva de la pradera permanente

No se observó un efecto de los tratamientos sobre las concentraciones foliares de proteína cruda (PC) y energía metabolizable (EM) en la pradera permanente ($p > 0,05$; Figura 19).

Las concentraciones foliares de PC y EM durante el período evaluado (septiembre 2013 a octubre 2015), fluctuaron entre 8%-27% y 2,08-2,77 Mcal kg^{-1} (Figura 19), respectivamente, coincidiendo con los rangos bajo a alto (18% a 28 % PC) y bajo a medio (2,67 a 2,93 Mcal kg^{-1}) en praderas permanentes fertilizadas de Osorno (Anrique *et al.*, 2008). En general, estos parámetros no fueron afectados por la fuente y dosis de P.

La concentración foliar de PC mostró variaciones durante el período de ejecución del ensayo de campo (Figura 19), indicando la variabilidad de la concentración foliar de PC en las distintas épocas del año.

Los datos obtenidos indican que sólo en el otoño del año 2 la pradera permanente fertilizada con dosis de mantención de P_2O_5 ha^{-1} independiente del tipo de fertilizante fosfatado es capaz de proporcionar por sí sola PC al ganado alimentado en base a sistema pastoril siempre que disponga de la cantidad de forraje adecuada.

La concentración foliar de EM no mostró mayores variaciones durante las distintas épocas del año (Figura 19). Todos los tratamientos presentaron niveles de EM bajo el límite de requerimiento de la pradera permanente, a excepción del otoño del año 2.

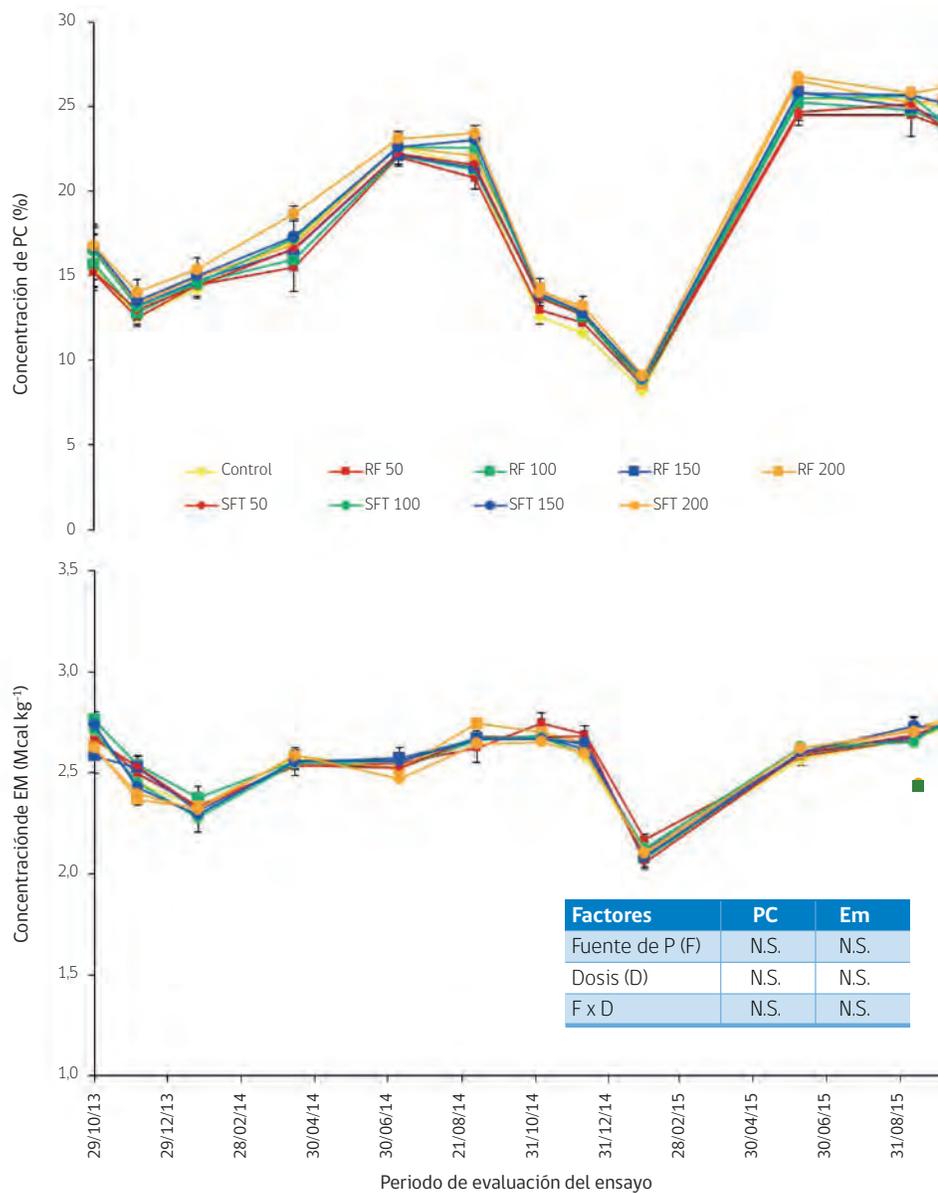


Figura 19. Efecto de la interacción tratamiento y momento de corte sobre las concentración foliares de proteína cruda (PC) y energía metabolizable (EM) en una pradera permanente en Remehue. Período: septiembre 2013 a octubre 2015.

6.1.4.6 Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en la pradera permanente

En la Figura 20, se observa que existe una relación significativa ($P < 0.05$) entre la absorción de P y la producción acumulada total de MS, donde los mayores rendimientos acumulados de MS se relacionan con las mayores absorciones de P con un ajuste de $R^2 = 0,89$.

A partir del ajuste lineal, se obtuvo un factor de demanda de fósforo de $3,1 \text{ kg P t MS}$ producida.

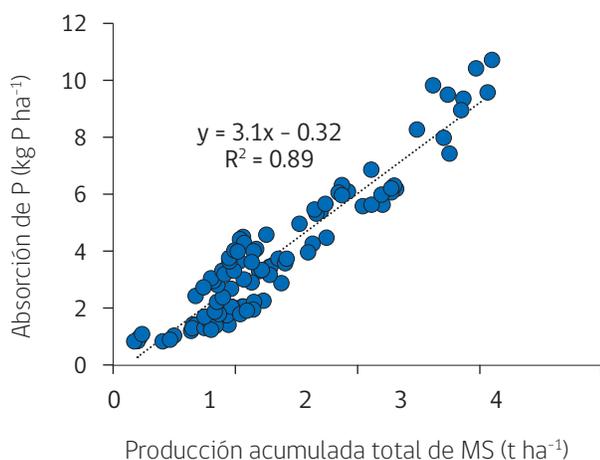


Figura 20. Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en una pradera permanente en Remehue.

6.1.4.7 Efecto de la fertilización fosfatada de mantención en los parámetros del suelo de la pradera permanente

En el Cuadro 10, se indica que sólo el efecto de las dosis de P_2O_5 fue significativo ($p < 0,05$) sobre la concentración de P disponible determinado con la metodología de la resina de intercambio iónico (P Resina) en el suelo Osorno del ensayo de campo de Remehue.

El pH en agua inicial del suelo fue moderadamente ácido ($5,8 \pm 0,03$; Cuadro 8) y la concentración inicial de P Olsen presentó un rango alto ($23 \pm 1,2 \text{ mg kg}^{-1}$, Cuadro 8). No se observó un efecto de los tratamientos sobre los valores de pH en agua y P Olsen ($p > 0,05$; Cuadro 10), coincidiendo con estudios realizados por Sierra (1993).

Los valores de pH en agua, disminuyeron en 0,1 a 0,2 unidades en relación al pH en agua inicial del suelo (Cuadro 8); esta disminución se puede atribuir a la variación estacional de

la época de muestreo. Los valores de pH en agua fluctuaron entre 5,6 a 5,8, coincidiendo con la condición ideal ($\text{pH} < 5,8$) para una adecuada respuesta del fertilizante fosfatado insoluble (RF), según lo reportado por Besoain *et al.* (1999a).

La aplicación de las diferentes dosis de fertilizante fosfatado fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$; Cuadro 11) en las concentraciones de P disponible (P Resina) y, aumentaron significativamente con las diferentes dosis de P_2O_5 , observándose las mayores concentraciones de P Resina con la dosis de 200 kg P_2O_5 aplicado como SFT y RF.

Cuadro 10. ANDEVA del efecto de los tratamientos sobre los parámetros del suelo de la pradera permanente al término del ensayo de campo en Remehue.

Factores	pH agua	P Olsen	P Resina
Fuente de P (F)	N.S.	N.S.	N.S.
Dosis (D)	N.S.	N.S.	**
F x D	N.S.	N.S.	N.S.

Las dosis de 100 y 150 kg P_2O_5 ha⁻¹ con RF mantuvieron la concentración de P Olsen inicial del suelo ($23 \pm 1,2$ mg kg⁻¹, Cuadro 8).

Por otro lado, la concentración de P disponible (P Olsen) disminuyó entre 1 a 4 mg kg⁻¹, en relación al P Olsen inicial del suelo (Cuadro 8) con los tratamientos control, 50 a 200 kg P_2O_5 ha⁻¹ con SFT; 50 y 200 kg P_2O_5 ha⁻¹ con RF; disminución que puede ser atribuida a la absorción de P por parte de la pradera permanente bajo corte.

La aplicación de las dosis de P de 100 a 200 kg P_2O_5 ha⁻¹ generaron concentraciones de P Olsen adecuadas (20–25 mg kg⁻¹; Teuber, 2009) para la producción de la pradera permanente, considerando que este suelo presentó un nivel inicial de P alto (Cuadro 8).

Las concentraciones de P Resina fluctuaron entre 15 a 33 mg kg⁻¹ (Cuadro 11) y están dentro del rango muy bajo a medio de P Resina en la solución del suelo (Saggar, 2016; comunicación personal).

La importancia de poder determinar la concentración de P en la solución del suelo, radica en que podemos conocer la concentración de P que se encuentra realmente disponible para ser absorbido por el sistema radicular de la planta contribuyendo a la nutrición, desarrollo y producción de las praderas de la zona sur que son fertilizadas con fertilizantes fosfatados insolubles (RF).

Cuadro 11. Efecto de la fertilización fosfatada de mantención sobre algunos parámetros del suelo al término del ensayo de campo en Remehue. Fecha: 28/09/15. (n=3).

Tratamiento	pH Agua	P Olsen	P Resina
		(mg kg ⁻¹)	
Control	5,8 a	19 a	15 e
RF 50	5,8 a	21 a	17 de
RF 100	5,7 a	23 a	25 c
RF 150	5,8 a	23 a	27 bc
RF 200	5,6 a	20 a	31 ab
SFT 50	5,7 a	19 a	17 de
SFT 100	5,8 a	22 a	22 cd
SFT 150	5,8 a	22 a	25 bc
SFT 200	5,7 a	22 a	33 a

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos, según prueba Tukey ($p < 0,05$).

Capítulo 7

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE ESTABLECIMIENTO EN UNA PRADERA DE BALLICA

.....



7.1 Evaluación de la fertilización fosfatada de establecimiento en una pradera de ballica

Se estableció un ensayo de campo en el Centro Experimental INIA La Pampa, Purranque, Andisol (Serie Osorno) con medio-alto nivel de P disponible (P Olsen inicial, estrata 0-20 cm: 18 ppm o mg kg^{-1}) con la finalidad de evaluar la efectividad de diferentes dosis de P_2O_5 ha^{-1} de fertilizantes fosfatados de establecimiento en una pradera de ballica perenne cv. Bealey.

7.1.1 Materiales y métodos

La colecta de datos meteorológicos y de muestras de suelo en el sitio experimental seleccionado, se realizó de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 6, punto 6.1.1.

El cálculo de las dosis de P_2O_5 de los tratamientos y la fertilización base del año 1 (Cuadro 12) y de la fertilización base del año 2 (Cuadro 13) del ensayo de campo se basó en el análisis de fertilidad inicial del suelo (Cuadros 14 y 15) para asegurar un nivel de fertilidad de suelo sin limitaciones para el adecuado crecimiento y desarrollo de la pradera de ballica.

El diseño experimental del ensayo de campo correspondió a bloques completos al azar ($n = 3$, parcelas de 9 m^2).

Cuadro 12. Nutrientes aplicados en el ensayo de campo de Purranque al año 1.

Nutriente	Dosis (kg ha^{-1})	Fuente
P_2O_5	0, 100, 150, 200 y 250	RF (28,9% P_2O_5), SFT (45% P_2O_5)
N*	120	Urea (46% N)
K_2O	200	Sulpomag (22% K_2O), KCl (60% K_2O)
MgO	40	Sulpomag (18% MgO)
S	40	Sulpomag (22% S)

*Aplicado en tres parcialidades.

Cuadro 13. Nutrientes aplicados en el ensayo de campo de Purranque al año 2.

Nutriente	Dosis (kg ha^{-1})	Fuente
N*	120	Urea (46% N)
K_2O	120	Sulpomag (22% K_2O), KCl (60% K_2O)
MgO	40	Sulpomag (18% MgO)
S	50	Sulpomag (22% S)

*Aplicado en tres parcialidades.

7.1.2 Manejos del ensayo de campo

Se realizó un barbecho químico en la pradera con la aplicación de glifosato (3 L ha^{-1}) y se preparó el suelo con pasadas de arado, rastra offset, emparejamiento con rastrillo y compactación con rodón.

La aplicación de los tratamientos y fertilizantes se realizó manualmente en el surco de siembra, tapando el fertilizante cada vez con rastrillo. Posteriormente, se sembró la semilla de ballica cv. Bealey, (35 kg ha^{-1}), se tapó con rastrillo y, finalmente se pasó rodón.

El control de malezas y de insectos se realizó de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 6, punto 6.1.2.

7.1.3 Análisis

La producción de materia verde total, producción de materia seca (MS), calidad mineral (N total y P foliar), calidad nutritiva (PC y EM), absorción de P de la pradera de ballica, concentración de fósforo disponible (P Resina y P Olsen) y análisis estadístico de los datos obtenidos, se realizó de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 6, punto 6.1.3.

7.1.4 Resultados

7.1.4.1 Caracterización climática de la localidad de Purranque durante el período experimental 2013-2015

En la Figura 21, se presentan los promedios históricos (36 años) y promedios actuales de precipitación diaria y temperaturas medias (aire y suelo) durante el período de ejecución del ensayo de campo.

Los promedios históricos de precipitación acumulada, temperatura del aire y temperatura del suelo fueron de 1.273 mm ; $10,1^\circ\text{C}$ y $11,5^\circ\text{C}$; respectivamente (Figura 21a).

Las precipitaciones se distribuyen uniformemente a través del año, siendo los meses más secos, fríos y cálidos los correspondientes a enero y noviembre, junio-julio y enero-febrero, respectivamente.

La temperatura del suelo $< 10^\circ\text{C}$ fluctuó entre mayo a septiembre.

La precipitación diaria, temperatura del aire y temperatura del suelo, en el sitio experimental de Purranque, fueron de 1.251 mm ; $10,7^\circ\text{C}$ y $11,5^\circ\text{C}$; respectivamente (Figura 21b).

Se observó que la precipitación real de la localidad de Purranque fue menor a su promedio histórico durante gran parte del período experimental, con excepción de los meses de septiembre 2013, junio 2014, julio 2014, septiembre 2014, julio 2015 y agosto 2015.

Los meses más secos fluctuaron entre diciembre a marzo, coincidiendo con el período de sequía estival de la localidad de Purranque, afectando el adecuado suministro de agua, lo cual deprimió el crecimiento normal de las especies prateses, afectando la productividad de MS de la pradera de ballica evaluada.

El período en que la temperatura del suelo fue $< 10^{\circ}\text{C}$ fluctuó entre los meses de junio a septiembre (Figura 21b).

7.1.4.2 Caracterización de las propiedades químicas del sitio experimental en Purranque

En los Cuadros 14 y 15, se presenta el nivel de fertilidad inicial del suelo Osorno de la localidad de Purranque y el nivel de fertilidad después de un año de aplicados los tratamientos, respectivamente. El suelo, presentó concentraciones media-alta de P y media de S.

Su reacción es moderadamente a ácida y la concentración de materia orgánica es alta. Las concentraciones de la suma de bases intercambiables y del Al intercambiable fueron media y, por ende, la saturación de Al fue baja.

En general, el suelo presentó un buen nivel de fertilidad (Cuadros 14 y 15), no existiendo limitaciones en los parámetros de acidez (pH, saturación de Al), por lo tanto, sin mayores deficiencias nutricionales para el normal crecimiento de la pradera de ballica evaluada.

Cuadro 14. Caracterización química inicial del sitio experimental en Purranque, estrata 0-20 cm (\pm error estándar, n=3). Fecha: 28/08/13.

Parámetro		Parámetro	
pH H ₂ O	5,5 \pm 0,02	Al int. (cmol(+) kg ⁻¹)	0,2 \pm 0,02
pH CaCl ₂	4,7 \pm 0,20	Saturación Al (%)	2,4 \pm 0,41
Materia orgánica (%)	16 \pm 0,7	Boro (mg kg ⁻¹)	0,6 \pm 0,05
P Olsen (mg kg ⁻¹)	18 \pm 0,9	Hierro (mg kg ⁻¹)	106 \pm 5,8
N disponible (mg kg ⁻¹)	54 \pm 4,2	Manganeso (mg kg ⁻¹)	17,6 \pm 0,61
S (mg kg ⁻¹)	15 \pm 3,6	Cobre (mg kg ⁻¹)	2,8 \pm 0,05
Suma Bases (cmol(+) kg ⁻¹)	8,5 \pm 0,62	Zinc (mg kg ⁻¹)	3,0 \pm 0,40

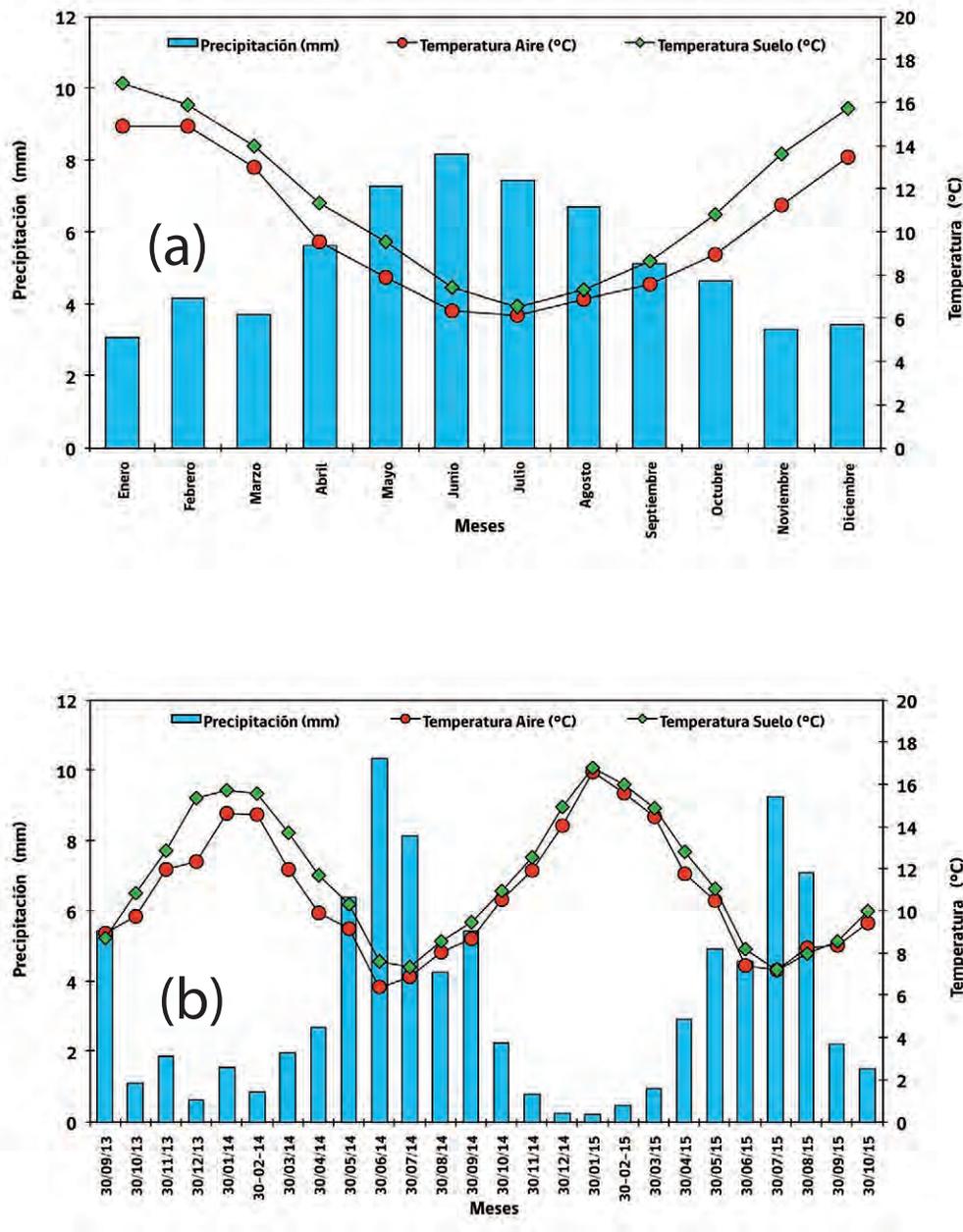


Figura 21. Promedios históricos (a) y promedios actuales (b) de precipitación diaria y temperaturas medias (aire y suelo) durante el período de ejecución del ensayo de campo en el sitio experimental del Centro Experimental de INIA La Pampa, Purranque.

Cuadro 15. Caracterización química al año 2 del sitio experimental en Purranque, estrata 0-10 cm (\pm error estándar, n=3). Fecha: 02/09/14.

Parámetro		Parámetro	
pH H ₂ O	5,6 \pm 0,02	Saturación Al (%)	2,9 \pm 0,10
pH CaCl ₂	4,9 \pm 0,01	Boro (mg kg ⁻¹)	0,6 \pm 0,07
Materia orgánica (%)	17 \pm 0,6	Hierro (mg kg ⁻¹)	121 \pm 15,2
N disponible (mg kg ⁻¹)	40 \pm 4,4	Manganeso (mg kg ⁻¹)	26,0 \pm 0,54
S (mg kg ⁻¹)	12 \pm 0,5	Cobre (mg kg ⁻¹)	3,4 \pm 0,06
Suma Bases (cmol(+) kg ⁻¹)	7,6 \pm 0,09	Zinc (mg kg ⁻¹)	3,8 \pm 0,22
Al int. (cmol(+) kg ⁻¹)	0,2 \pm 0,01		

7.1.4.3 Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera de ballica

En la Figura 22, se presenta el efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento sobre la producción acumulada de MS en la pradera de ballica, durante el periodo de ejecución del ensayo de campo (septiembre 2013 a octubre 2015, período en el cual se realizaron 13 cortes).

La producción acumulada de MS en el año 1, año 2 y total (año 1 + año 2) fue significativamente ($p < 0,05$; Figura 22) afectada por la dosis de P₂O₅, la época de corte y por la interacción de ambos factores. Sin embargo, la producción acumulada de MS no fue afectada ($p > 0,05$) por el tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

La interacción significativa indica que las respuestas en la producción de MS frente a la fertilización fosfatada varían según la época de corte, asociada a las condiciones climáticas de la zona (Figura 21b).

La producción acumula de MS correspondiente al año 1 (1° al 6° corte, Figura 22) fue significativamente menor ($p < 0,05$) en el tratamiento control (10,3 \pm 0,15 t MS ha⁻¹) y mayor con la dosis 250 kg P₂O₅ ha⁻¹ (13,3 \pm 0,65 t MS ha⁻¹ con RF y 13,1 \pm 0,28 t MS ha⁻¹ con SFT).

Los otros tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$), independientemente del fertilizante fosfatado aplicado, y presentaron el orden decreciente: 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ > 150 kg P₂O₅ ha⁻¹ > 50 kg P₂O₅ ha⁻¹.

La aplicación de RF y SFT generaron aumentos de la producción acumulada de MS en el año 1, en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 5% a 29% y 8% a 27% (Figura 23).

La producción acumulada de MS del año 2 (7° al 13° corte, Figura 22) en respuesta a la aplicación de las diferentes dosis de P₂O₅ fue estadísticamente diferente entre sí ($p <$

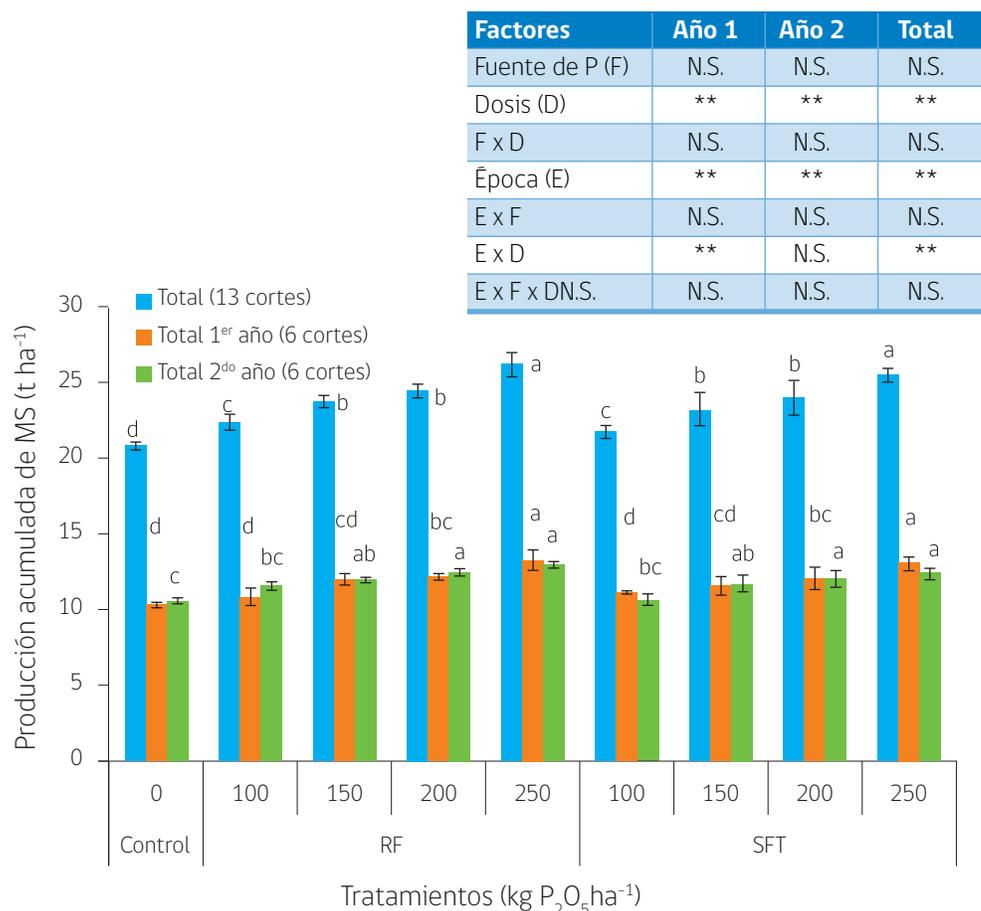


Figura 22. Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera de ballica. Localidad: Purranque. Período: septiembre 2013-octubre 2014 (\pm error estándar, $n=3$). Letras diferentes indican diferencias entre dosis de fertilización, obtenidas con el test de Fischer ($p < 0,05$).

0,05), siendo menor en el tratamiento control ($10,6 \pm 0,18$ t MS ha⁻¹) y mayor con las dosis de 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ ($12,8 \pm 0,24$ t MS ha⁻¹ con RF y $11,6 \pm 0,51$ t MS ha⁻¹ con SFT) y 250 kg P₂O₅ ha⁻¹ ($12,6 \pm 0,15$ t MS ha⁻¹ con RF y $12,5 \pm 0,26$ t MS ha⁻¹ con SFT).

Los demás tratamientos presentaron el siguiente orden decreciente: 150 kg P₂O₅ ha⁻¹ > 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Figura 22), independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

Se generaron aumentos de la producción acumulada de MS en el año 2 (Figura 23), en relación al tratamiento control, con las diferentes dosis de P₂O₅ como RF y SFT que fluctuaron entre 9% a 21% y 3% a 18%, respectivamente.

La producción acumula total de MS (1° al 13° corte, Figura 22) en el período de ejecución del ensayo de campo fue significativamente ($p < 0,05$) mayor con la dosis de $250 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ en ambos fertilizantes fosfatados ($25,8 \pm 0,64 \text{ t MS ha}^{-1}$ con RF y $25,5 \pm 0,51 \text{ t MS ha}^{-1}$ con SFT) y menor con el tratamiento control ($21,0 \pm 0,09 \text{ t MS ha}^{-1}$).

Los demás tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$) y siguieron el orden decreciente: $200 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$; $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ > $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado a la pradera de ballica.

Tanto la RF como el SFT generaron aumentos de la producción acumulada total de MS, en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 6% a 23% y 3% a 21%, respectivamente (Figura 23).

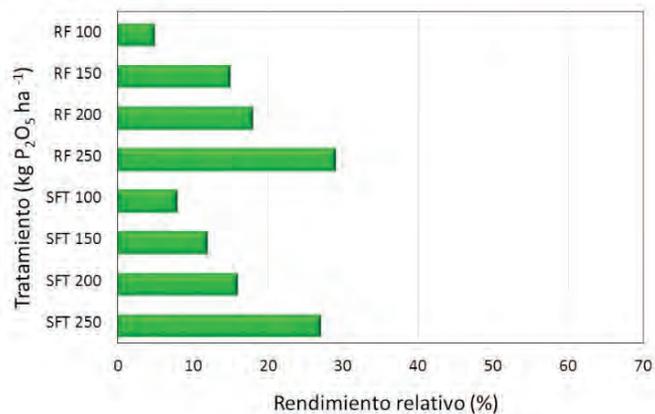
Los tratamientos control (sin P), en ambos años, presentaron la menor producción de MS para la estación primavera y otoño (Figura 21).

Los tratamientos de las mayores dosis de P_2O_5 aplicadas, presentaron una producción de MS mayor, independiente de la época del año (Figura 22). La producción de forraje fue mayor en el año 1 en comparación con el año 2, lo cual se atribuye a la condición de déficit hídrico (Figura 21b).

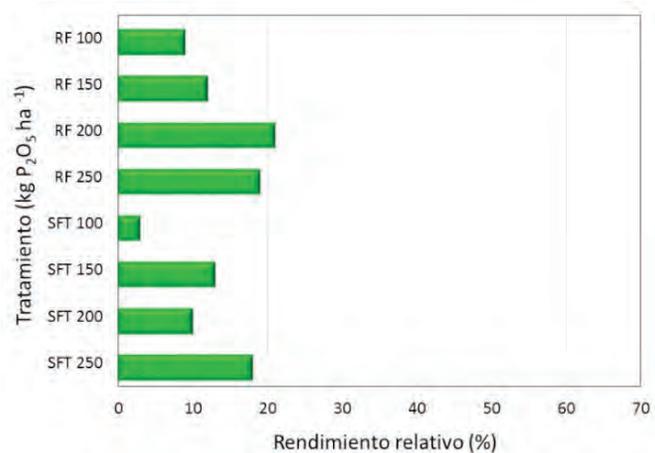
Las mayores producciones de MS de la pradera de ballica se obtuvieron en las épocas estival e invernal del año 1 y en la primavera el año 2; debido al déficit hídrico de la época estival en el año 2 que afectó la producción de forraje de la pradera de ballica durante el resto del año.

Los tratamientos con Roca fosfórica, durante la estación de primavera, registraron un aumento en la producción de MS a medida que se incrementaron las dosis de P_2O_5 . Similar tendencia se presentó en las estaciones de verano y otoño de ambos años. Sin embargo, los tratamientos con Superfosfato triple dicha tendencia es menos evidente (Figura 22).

Año 1



Año 2



**Total
(año 1 + año 2)**

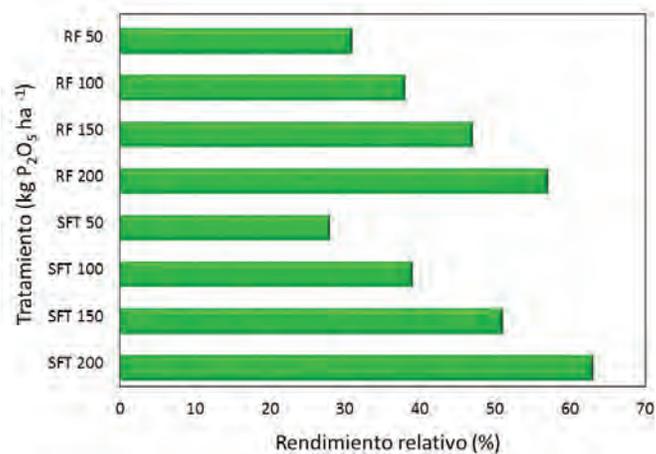


Figura 23. Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en el rendimiento relativo de producción acumulada de materia seca en una pradera de ballica. Localidad: Purranque.

7.1.4.4 Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en la concentración foliar de fósforo

Los tratamientos de fertilización fosfatada de establecimiento no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0,05$; Figura 24) en la concentración foliar de P de la pradera de ballica en Purranque.

La concentración foliar de P fluctuó aproximadamente entre 1,3 a 3,3 g P kg⁻¹ (Figura 24), dependiendo de la época del año (variación estacional), resultados que se encuentran dentro del rango normal a alto de concentración foliar de P en praderas de ballica fertilizadas de la zona sur (1,5 a 3,7 g P kg⁻¹), reportados por Anrique *et al.* (2008).

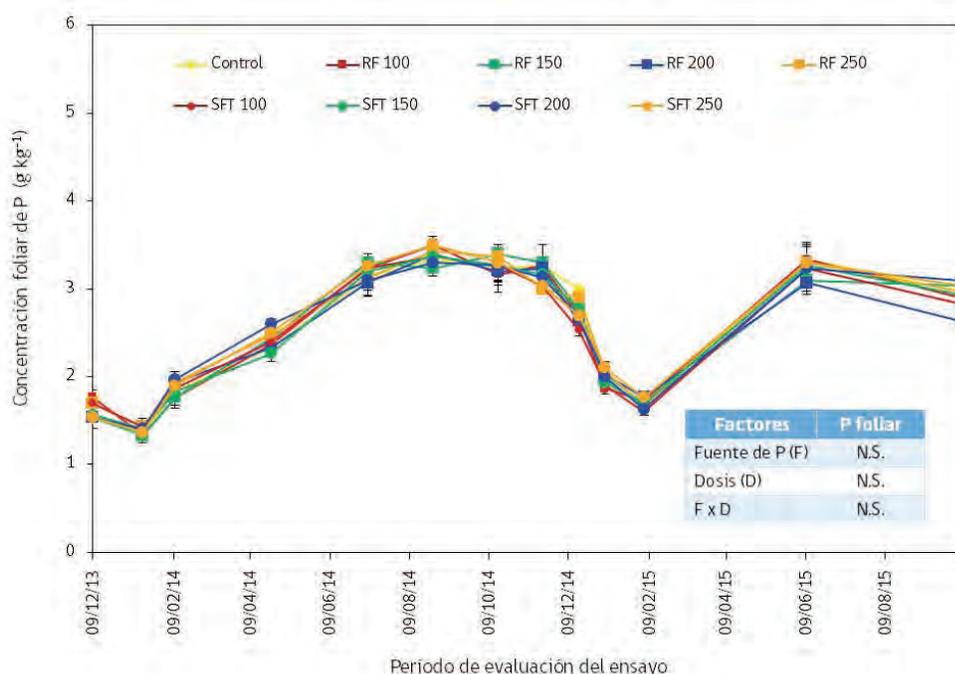


Figura 24. Efecto de la interacción tratamiento y momento de corte sobre la concentración foliar de fósforo en una pradera de ballica en Purranque. Período: septiembre 2013 a octubre 2015.

En el año 1, independientemente de la dosis de P₂O₅ y del tipo de fertilizante fosfatado aplicado, durante el verano e invierno los requerimientos de P de la pradera de ballica están cubiertos. En cambio, en el año 2, los límites de requerimiento de P fueron en primavera e invierno (Figura 24).

Por otro lado, ninguno de los tratamientos con ambos tipos de fertilizantes fosfatado en el período evaluado, presentaron concentraciones suficientes de P foliar, considerando los requerimientos de una pradera de ballica (Benton *et al.*, 1991).

Los datos obtenidos sugieren que el ganado alimentado en base a praderas de ballica fertilizadas con dosis de P_2O_5 de establecimiento, requieren de períodos de suplementación con P para evitar déficit nutricional y, por ende, su efecto detrimental en la producción de carne y/o leche.

7.1.4.5 Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en la calidad mineral en una pradera de ballica

Los tratamientos de fertilización fosfatada de establecimiento aplicados y evaluados a la pradera de ballica en Purranque no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$; Figura 25) entre sí en las concentraciones foliares de proteína cruda (PC) y energía metabolizable (EM).

Las concentraciones foliares de PC y EM de la pradera de ballica presentaron variaciones estacionales, con disminución de sus concentraciones en la época estival como era de esperar para un forraje con madurez fisiológica (asociada al déficit hídrico, Figura 21) y aumentos de sus concentraciones durante la época invernal, lo cual está asociado al estado vegetativo de la planta (Figura 21), que fluctuaron entre 9,23% a 26,0% y 2,25 a 2,87 Mcal kg^{-1} , respectivamente, coincidiendo con los rangos normal a alto (8,83% a 20,45 % PC) y bajo a alto (2,34 a 2,83 Mcal kg^{-1}) en praderas de ballica fertilizadas para la zona sur, de acuerdo a estudios realizados por Anrique *et al.* (2008).

En el año 1, independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado, sólo en primavera-verano y con las dosis más altas de P_2O_5 ha^{-1} en otoño la pradera de ballica es capaz de proporcionar PC según los requerimientos sugeridos por Anrique *et al.* (2008). En cambio, en el año 2, los límites de requerimiento de PC se reducen sólo a la primavera (Figura, 25).

La concentración foliar de EM no mostró mayores variaciones durante las distintas épocas del año (Figura 25), sin embargo, los tratamientos evaluados presentaron niveles sobre el límite de requerimiento (Anrique *et al.*, 2008) de una pradera de ballica en ambos años.

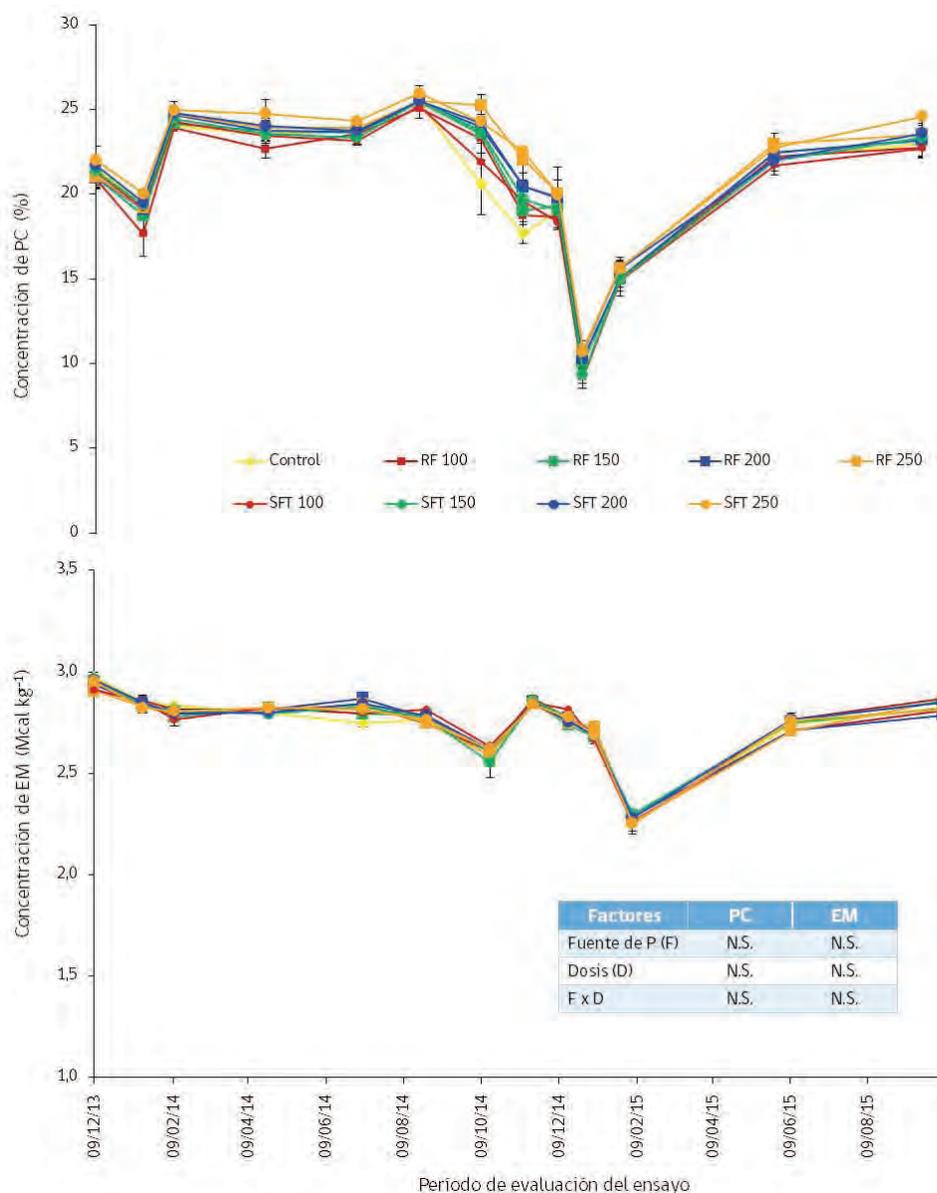


Figura 25. Efecto de la interacción tratamiento y momento de corte sobre la concentración foliar de proteína cruda y energía metabolizable de una pradera de ballica en Purranque. Período: septiembre 2013 a octubre 2015.

7.1.4.6 Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en una pradera de ballica

En la Figura 26, se observa la relación directa entre la absorción de P y la producción acumulada total de MS (13 cortes), donde los mayores rendimientos acumulados de MS se relacionan con las mayores absorciones de P con un ajuste de $R^2 = 0,61$.

Considerando el ajuste lineal obtenido, se generó un factor de demanda de fósforo de 2,49 kg P t MS producida.

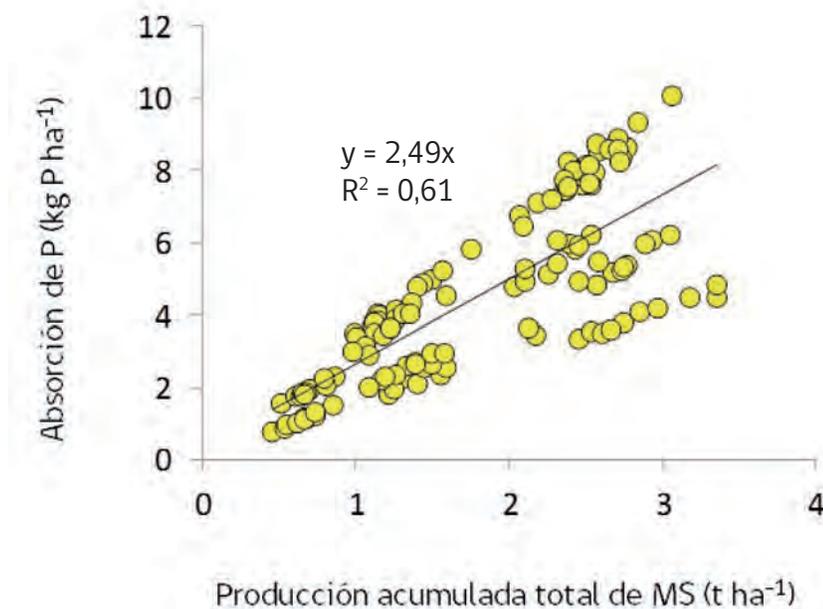


Figura 26. Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en una pradera de ballica en Purranque. Período: septiembre 2013 a octubre 2015.

7.1.4.7 Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento en los parámetros del suelo de la pradera de ballica

El efecto de las diferentes dosis de P_2O_5 evaluadas en la respuesta del suelo bajo pradera de ballica fue significativo ($p < 0,05$; Cuadro 16) sólo en el parámetro concentración de P disponible determinado por el método de la resina de intercambio iónico (P Resina).

Cuadro 16. ANDEVA del efecto de los tratamientos sobre los parámetros del suelo de la pradera de ballica al término del ensayo de campo en Purranque.

Factores	pH agua	P Olsen	P Resina
Fuente de P (F)	N.S.	N.S.	N.S.
Dosis (D)	N.S.	N.S.	**
F x D	N.S.	N.S.	N.S.

En el Cuadro 17, se observan algunos parámetros del suelo, medidos al finalizar el ensayo de campo en Purranque (28 de septiembre de 2015).

No se observó un efecto de los tratamientos sobre los valores de pH en agua y P disponible (P Olsen; $p > 0,05$; Cuadro 16), coincidiendo con estudios realizados por Sierra (1993).

El pH en agua inicial del suelo fue moderadamente ácido ($5,5 \pm 0,02$; Cuadro 14) y la concentración inicial de P Olsen fue medio-alto ($18 \pm 0,9 \text{ mg kg}^{-1}$, Cuadro 14).

Los valores de pH en agua, disminuyeron en 0,1 unidades en relación al pH en agua inicial del suelo; atribuido a la variación generada por la época de muestreo. Los valores de pH en agua fluctuaron entre 5,5-5,6 indicando una condición ideal ($\text{pH} < 5,8$) para una adecuada respuesta a la aplicación directa de la RF (Besoain *et al.*, 1999a).

La aplicación de las diferentes dosis de P_2O_5 en la concentración de P Resina fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$; Cuadro 17) y aumentaron significativamente con las dosis de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, observándose las mayores concentraciones de P Resina con la dosis de $250 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (48 mg kg^{-1} con SFT y 44 mg kg^{-1} con RF).

Por otro lado, la concentración de P Olsen disminuyó en 3 mg kg^{-1} , en relación al P Olsen inicial del suelo (Cuadro 14) con el tratamiento RF $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, los demás tratamientos aumentaron en 1 a 9 mg kg^{-1} la concentración de P Olsen, generando concentraciones de P Olsen adecuadas ($20\text{-}25 \text{ mg kg}^{-1}$; Teuber, 2009) para la producción de la pradera de ballica, considerando que este suelo presentó un nivel inicial medio de P (Cuadro 14).

Las concentraciones de P Resina fluctuaron entre 13 a 44 mg kg^{-1} y 13 a 48 mg kg^{-1} (Cuadro 17) con el fertilizante fosfatado insoluble y el fertilizante fosfatado soluble, respectivamente, indicando un rango muy bajo a medio de P en la solución del suelo (Saggar, 2016; comunicación personal).

Cuadro 17. Efecto de la fertilización fosfatada de establecimiento sobre algunos parámetros del suelo al término del ensayo de campo en Purranque. Fecha: 28/09/15. (n=3).

Tratamiento	pH Agua	P Olsen	P Resina
		(mg kg ⁻¹)	
Control	5,6 a	19 a	13 e
RF 100	5,6 a	15 a	21 de
RF 150	5,6 a	25 a	26 cde
RF 200	5,5 a	27 a	31 bcd
RF 250	5,5 a	19 a	44 ab
SFT 100	5,5 a	20 a	19 de
SFT 150	5,5 a	20 a	25 cde
SFT 200	5,5 a	27 a	37 abc
SFT 250	5,5 a	20 a	48 a

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos, según prueba Tukey ($p < 0,05$).

Capítulo 8

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE CORRECCIÓN EN UNA PRADERA NATURALIZADA

.....



8.1. Evaluación de la fertilización fosfatada de corrección en una pradera naturalizada

Se estableció un ensayo de campo en el Predio “El Ñadi”, Fresia, propiedad del agricultor Sr. Sergio Mödinger Gebauer, sobre un Andisol (Serie Nueva Braunau) con deficitario nivel de P disponible (P Olsen inicial, estrata 0–10 cm: 11 ppm o mg kg^{-1}) con la finalidad de evaluar la efectividad de diferentes dosis de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ de fertilizantes fosfatados en una pradera naturalizada.

8.1.1 Materiales y métodos

La colecta de datos meteorológicos y de muestras de suelo en el sitio experimental seleccionado, se realizó de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 6, punto 6.1.1.

Se calcularon las dosis de P_2O_5 de los tratamientos y fertilización base del año 1 (Cuadro 18) y de la fertilización base año 2 (Cuadro 19) del ensayo de campo en base al análisis de fertilidad inicial del suelo (Cuadros 20 y 21) para asegurar un nivel de fertilidad de suelo sin limitaciones para el adecuado crecimiento y desarrollo de la pradera naturalizada.

El diseño experimental del ensayo de campo correspondió a bloques completos al azar ($n = 3$, parcelas de 9 m^2).

Cuadro 18. Nutrientes aplicados en el ensayo de campo de Fresia al año 1.

Nutriente	Dosis (kg ha^{-1})	Fuente
P_2O_5	0, 100, 250, 500 y 750	RF (28,9% P_2O_5), SFT (45% P_2O_5)
N*	120	Urea (46% N)
K_2O	150	Sulpomag (22% K_2O), KCl (60% K_2O)
MgO	40	Sulpomag (18% MgO)
S	40	Sulpomag (22% S)

*Aplicado en tres parcialidades.

Cuadro 19. Nutrientes aplicados en el ensayo de campo de Fresia al año 2.

Nutriente	Dosis (kg ha^{-1})	Fuente
N*	120	Urea (46% N)
K_2O	120	Sulpomag (22% K_2O), KCl (60% K_2O)
MgO	40	Sulpomag (18% MgO)
S	50	Sulpomag (22% S)

*Aplicado en tres parcialidades.

8.1.2 Manejos del ensayo de campo

La preparación del sitio experimental y, los controles de malezas e insectos, se realizó de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 6, punto 6.1.2.

8.1.3 Análisis

La producción de materia verde total, producción de materia seca (MS), calidad mineral (N total y P foliar), calidad nutritiva (PC y EM), absorción de P de la pradera de ballica, concentración de fósforo disponible (P Resina y P Olsen) y análisis estadístico de los datos obtenidos, se realizó de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 6, punto 6.1.3.

8.1.4 Resultados

8.1.4.1 Caracterización climática de la localidad de Fresia durante el período experimental 2013-2015

En la Figura 27, se presentan los promedios históricos (5 años) y promedios actuales de precipitación diaria y temperaturas medias (aire y suelo) durante el período de ejecución del ensayo de campo.

Los promedios históricos de la precipitación acumulada, temperatura del aire y temperatura del suelo fueron de 1.252 mm; 10,6°C y 12,1°C; respectivamente (Figura 27a).

Las precipitaciones se distribuyen de forma uniforme a lo largo del año, siendo los meses más secos, fríos y cálidos los correspondientes a enero y noviembre, junio-julio y enero-febrero, respectivamente.

La temperatura del suelo < 10°C fluctuó entre los meses de junio a septiembre.

La precipitación diaria, temperatura del aire y temperatura del suelo, en el sitio experimental de Fresia, fueron de 1.278 mm; 10,5°C y 12,1°C; respectivamente (Figura 27b).

En la Figura 27, se observa que la precipitación actual de la localidad de Fresia se distribuyó uniformemente durante el período de ejecución del ensayo, siendo similar al promedio histórico.

Los meses más secos fluctuaron entre diciembre a marzo, coincidiendo con el período de

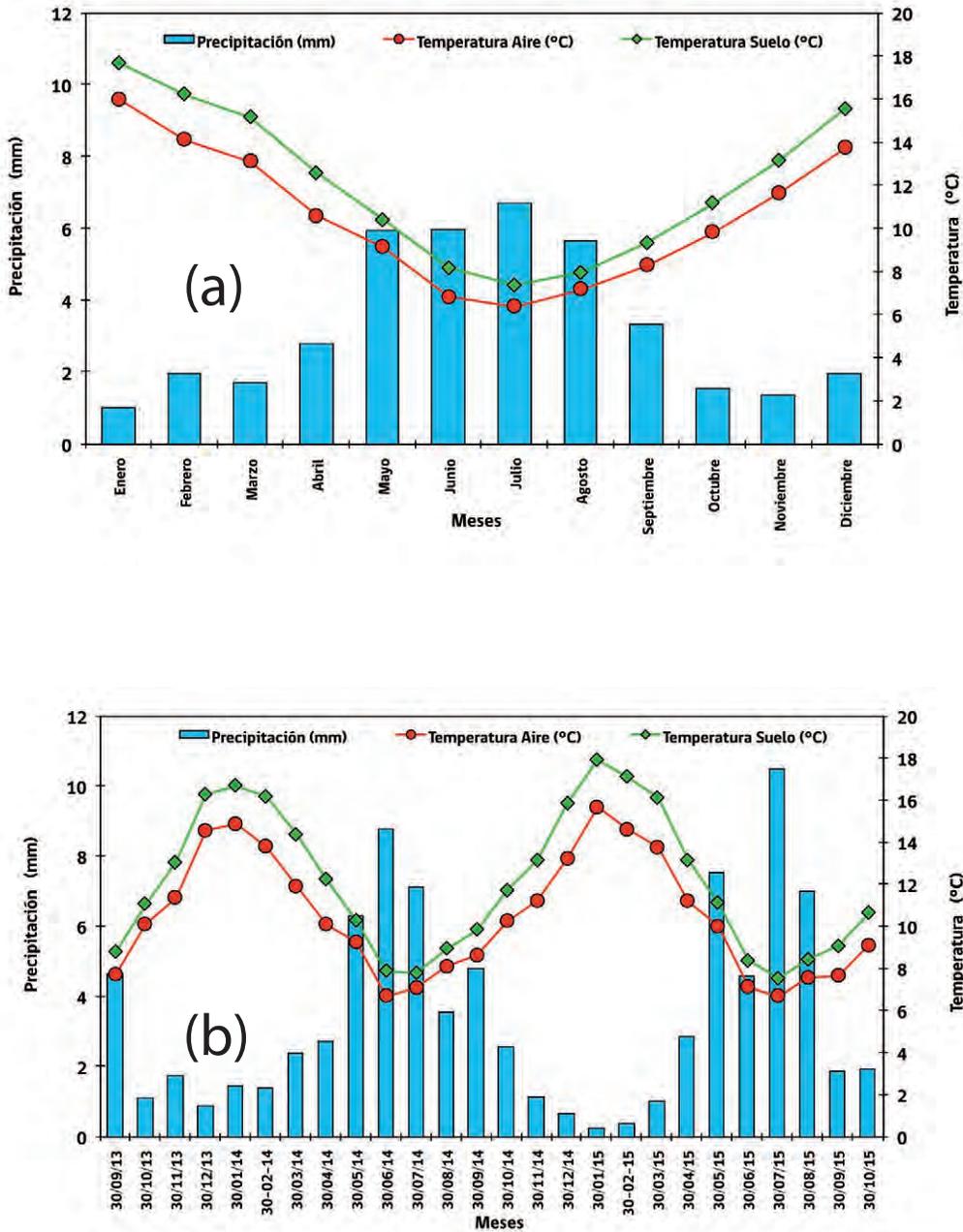


Figura 27. Promedios históricos (a) y promedios actuales (b) de precipitación diaria y temperaturas medias (aire y suelo) durante el período de ejecución del ensayo de campo en el sitio experimental de Fresia.

sequía estival de la localidad de Fresia. Este déficit de precipitaciones afectó el adecuado suministro de agua, lo cual deprimió el crecimiento normal de las especies pratenses, afectando la productividad de MS de la pradera naturalizada evaluada.

El período en que la temperatura del suelo fue $< 10^{\circ}\text{C}$ fluctuó entre los meses de junio a septiembre (Figura 27b).

8.1.4.2 Caracterización de las propiedades químicas del sitio experimental en Fresia

En los Cuadros 20 y 21, se presenta el nivel de fertilidad inicial del suelo Nueva Braunau de la localidad de Fresia y el nivel de fertilidad después de un año de aplicados los tratamientos, respectivamente. El suelo, presentó concentraciones deficitarias de P y S.

Su reacción es moderadamente a ácida y la concentración de materia orgánica es alta. Las concentraciones de la suma de bases intercambiables y del Al intercambiable fueron media a alta y baja, respectivamente y, por ende, la saturación de Al fue baja (Cuadros 20 y 21).

Cuadro 20. Caracterización química inicial del sitio experimental en Fresia, estrata 0-10 cm (\pm error estándar, n=3). Fecha: 28/08/13.

Parámetro		Parámetro	
pH H_2O	5,9 \pm 0,03	Al int. (cmol(+) kg^{-1})	0,1 \pm 0,03
pH CaCl_2	5,1 \pm 0,07	Saturación Al (%)	1,4 \pm 0,64
Materia orgánica (%)	26 \pm 0,9	Boro (mg kg^{-1})	0,8 \pm 0,01
P Olsen (mg kg^{-1})	11 \pm 3,2	Hierro (mg kg^{-1})	139 \pm 25,8
N disponible (mg kg^{-1})	44 \pm 7,8	Manganeso (mg kg^{-1})	20,4 \pm 4,82
S (mg kg^{-1})	5 \pm 1,0	Cobre (mg kg^{-1})	2,7 \pm 0,46
Suma Bases (cmol(+) kg^{-1})	10,5 \pm 1,84	Zinc (mg kg^{-1})	14,2 \pm 6,60

Cuadro 21. Caracterización química al año 2 del sitio experimental en Fresia, estrata 0-10 cm (\pm error estándar, n=3). Fecha: 02/09/14.

Parámetro		Parámetro	
pH H_2O	5,8 \pm 0,02	Saturación Al (%)	0,84 \pm 0,05
pH CaCl_2	5,1 \pm 0,07	Boro (mg kg^{-1})	0,6 \pm 0,04
Materia orgánica (%)	27 \pm 0,4	Hierro (mg kg^{-1})	125 \pm 11,4
N disponible (mg kg^{-1})	44 \pm 6,9	Manganeso (mg kg^{-1})	27,4 \pm 1,45
S (mg kg^{-1})	6 \pm 1,1	Cobre (mg kg^{-1})	2,8 \pm 0,04
Suma Bases (cmol(+) kg^{-1})	11,5 \pm 0,23	Zinc (mg kg^{-1})	3,0 \pm 0,16
Al int. (cmol(+) kg^{-1})	0,1 \pm 0,01		

En general, el suelo no presentó limitaciones en los parámetros de acidez (pH, saturación de Al), sin embargo, presentó un bajo nivel de fertilidad con deficiencias nutricionales (P y S) para el normal crecimiento de las especies pratenses de la pradera naturalizada evaluada.

8.1.4.3 Efecto de la fertilización fosfatada de corrección sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera naturalizada

En la Figura 28, se presentan el efecto de los tratamientos sobre la producción acumulada de MS en la pradera naturalizada en Fresia, durante el periodo de ejecución del ensayo de campo (septiembre 2013 a octubre 2015, 9 cortes).

La producción acumulada de MS en el año 1, en el año 2 y total (año 1 + año 2) fue significativamente ($p < 0,05$; Figura 28) afectada por la dosis de P_2O_5 , la época de corte y por la interacción de ambos factores.

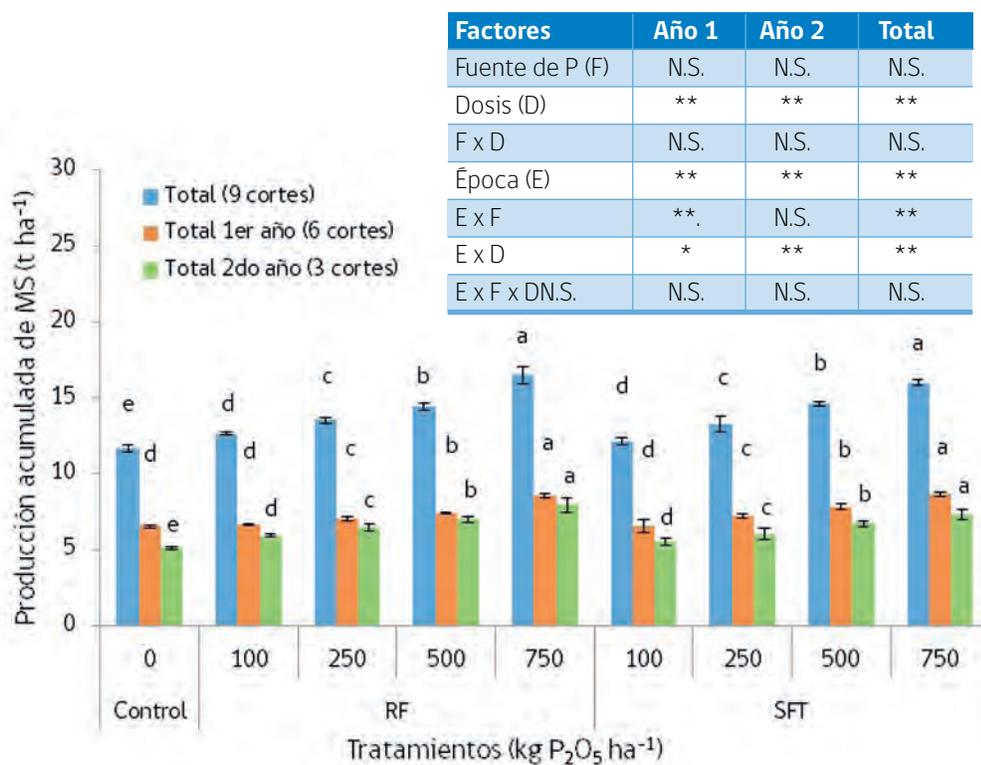


Figura 28. Efecto de la fertilización fosfatada de corrección sobre la producción acumulada de materia seca en una pradera naturalizada de Fresia. Período: septiembre 2013-octubre 2015. (\pm error estándar, $n=3$). Letras diferentes indican diferencias entre dosis de fertilización, obtenidas con el test de Fischer ($p < 0,05$).

Por otro lado, se observó que la producción de MS no fue afectada ($p > 0,05$; Figura 28) por el tipo de fertilizante fosfatado. La interacción significativa indica que las respuestas en producción de MS frente a la fertilización fosfatada varían según la época de corte, en estrecha relación con los parámetros climáticos de la zona (Figura 27b).

La producción acumulada de MS correspondiente al año 1 (1° al 6° corte, Figura 28) fue significativamente mayor ($p < 0,05$) con la dosis $750 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ($8,7 \pm 0,13 \text{ t MS ha}^{-1}$ con SFT y $8,6 \pm 0,16 \text{ t MS ha}^{-1}$ con RF) y menor en el tratamiento control, sin P, ($6,6 \pm 0,10 \text{ t MS ha}^{-1}$).

Los demás tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí ($p < 0,05$) y presentaron el siguiente orden decreciente: $500 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 250 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, independiente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

La aplicación de RF y SFT generaron aumentos de producción acumulada de MS (Figura 29), en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 2% a 30% y 1% a 32%, respectivamente.

La producción acumulada de MS del año 2 (7° al 9° corte, Figura 28) en respuesta a la aplicación de los tratamientos fue estadísticamente diferente entre sí ($p < 0,05$), siendo menor en el tratamiento control ($5,1 \pm 0,12 \text{ t MS ha}^{-1}$) y mayor con la dosis de $750 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ($8,0 \pm 0,48 \text{ t MS ha}^{-1}$ con RF y $7,3 \pm 0,33 \text{ t MS ha}^{-1}$ con SFT).

Los demás tratamientos presentaron el siguiente orden decreciente: $500 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 250 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, independiente de la fuente de P aplicada.

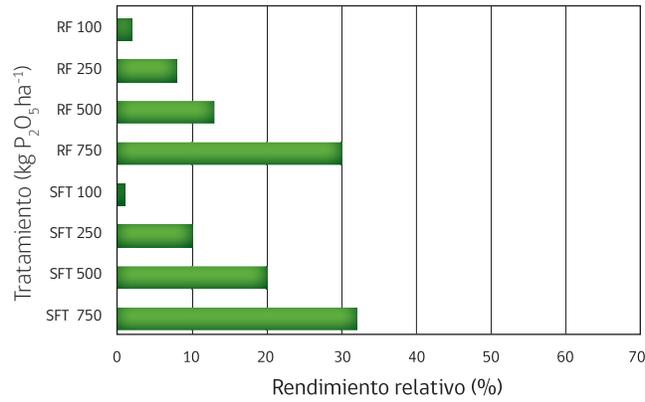
Ambas fuentes fosfatadas, RF y SFT, generaron aumentos de la producción acumulada de MS en el año 2 (Figura 29), en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 17% a 55% y 8% a 43%, respectivamente.

En comparación con el año 1, se observa una mayor producción de MS en el año 2, asociada a los tratamientos con RF; debido a que su aplicación en praderas genera P disponible en la solución del suelo, a través de una lenta disolución del P como consecuencia de sus propiedades de liberación lenta. Por lo tanto, los tratamientos con RF requieren de mayor tiempo para que la pradera naturalizada alcance su potencial productivo.

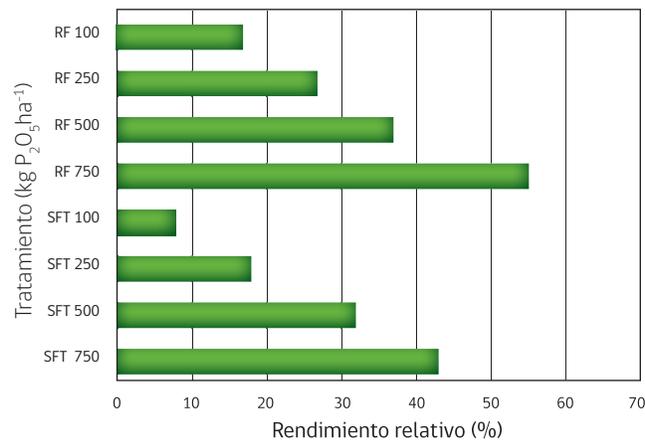
La producción acumulada total de MS (1° al 9° corte) fue significativamente ($p < 0,05$; Figura 28) mayor con la dosis de $750 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ en ambas fuentes de P ($16,5 \pm 0,58 \text{ t MS ha}^{-1}$ con RF y $16,0 \pm 0,21 \text{ t MS ha}^{-1}$ con SFT) y menor en el tratamiento control ($11,7 \pm 0,21 \text{ t MS ha}^{-1}$).

Los demás tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí y presentaron siguiente orden decreciente: $500 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 250 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} > 100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, independientemente del fertilizante fosfatado aplicado a la pradera naturalizada.

Año 1



Año 2



**Total
(año 1 + año 2)**

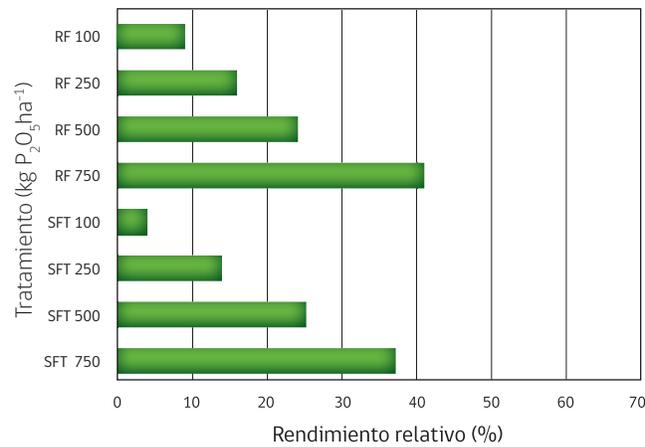


Figura 29. Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en el rendimiento relativo de producción acumulada de materia seca en una pradera naturalizada. Localidad: Fresia.

Tanto la aplicación de RF como el SFT generaron aumentos de la producción acumulada total de MS (Figura 29), en relación al tratamiento control, que fluctuaron entre 9% a 41% y 4% a 37%, respectivamente.

Los tratamientos control (sin P) presentaron la menor producción de MS (Figura 28) en ambos años evaluados. Se observa una mayor producción de MS en la pradera naturalizada a medida que se incrementó la dosis de P_2O_5 , independientemente del año evaluado.

Sin embargo, en el año 2 no se generó producción de MS en verano; debido a dos motivos: i) gran extracción de nutrientes de la pradera naturalizada bajo corte y, ii) desfase en la aplicación de la segunda fertilización base (25/09/14), que sumado al déficit hídrico de la temporada estival (Figura, 27b) generó un efecto detrimental en la producción de MS.

8.1.4.4 Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en la concentración foliar de fósforo

Los tratamientos de fertilización fosfatada de corrección no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0,05$; Figura 30) en la concentración foliar de P de la pradera naturalizada.

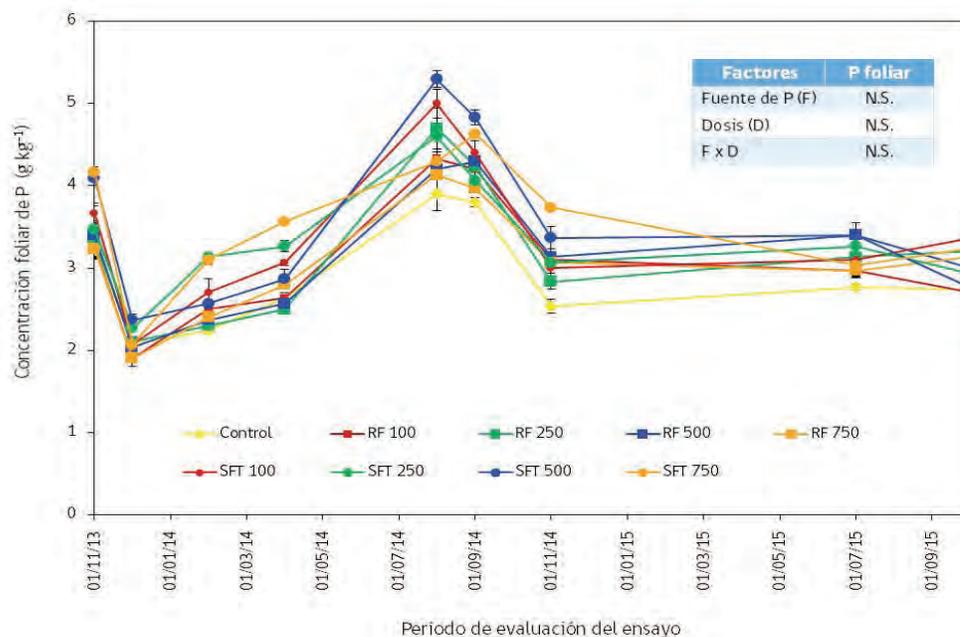


Figura 30. Efecto de la interacción tratamiento y momento de corte sobre la concentración foliar de fósforo en una pradera naturalizada en Fresia. Período: septiembre de 2013 a octubre de 2015.

La concentración foliar de P, durante el período de ejecución del ensayo, fluctuó aproximadamente entre 2 a 5 g P kg⁻¹ (Figura 30), resultados que se encuentran dentro del rango normal a alto de P en praderas naturales fertilizadas de la localidad de Llanquihue (1,5 a 3,7 g P kg⁻¹), reportados por Anrique *et al.* (2008).

La concentración foliar de P mostró variaciones durante el período de ejecución del ensayo (Figura 30), indicando la variabilidad de la concentración foliar de P en las distintas épocas del año. Podemos observar que en el año 1, sólo en verano e invierno y que con las dosis más altas de P₂O₅ con el fertilizante fosfatado soluble (SFT) en primavera y otoño se alcanzan suministros suficientes de P para la pradera naturalizada.

En el año 2, las dosis más altas de P₂O₅ con el fertilizante fosfatado soluble (SFT) y las dosis más altas de P₂O₅ independiente del tipo de fertilizante fosfatado, se alcanzan los requerimientos de P de la pradera naturalizada (Figura 30).

Al considerar los requerimientos de una pradera naturalizada (Anrique *et al.*, 2008), los tratamientos con las dosis más altas de RF y SFT en primavera e invierno del año 1 y, todos los tratamientos en otoño e invierno del año 2 se traducen en suministros suficientes de P foliar.

Estos resultados pueden generar información sobre los períodos de suplementación con P del ganado alimentado en base a praderas naturalizadas fertilizadas con dosis de P₂O₅ ha⁻¹ de corrección, que eviten posible déficit nutricional y, por ende, efectos detrimentales en la producción de carne y/o leche.

8.1.4.5 Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en la calidad nutritiva de la pradera naturalizada

La ANDEVA indica que los tratamientos evaluados no mostraron diferencias significativas entre sí ($p > 0,05$; Figura 31) en la concentración foliar de proteína cruda (PC) y energía metabolizable (EM) de la pradera naturalizada.

La concentración foliar de PC (Figura 31), durante el período evaluado (septiembre de 2013 a octubre de 2015), fluctuó entre 16% (SFT 100 kg P₂O₅ ha⁻¹) a 29% (RF 750 kg P₂O₅ ha⁻¹) coincidiendo con el rango normal a alto (16% a 26 % PC) en praderas naturales fertilizadas de la zona de Llanquihue, indicado por Anrique *et al.* (2008).

Por su parte, la concentración foliar de EM (Figura 31), durante el mismo período de evaluación, fluctuó entre 2,5 Mcal kg⁻¹ (SFT 750 kg P₂O₅ ha⁻¹) a 2,9 Mcal kg⁻¹ (RF 250 kg P₂O₅ ha⁻¹), rango considerado normal a alto (2,37–2,63 Mcal kg⁻¹) para praderas naturales fertilizadas de la zona de Llanquihue, según Anrique *et al.* (2008).

Las concentraciones foliares de PC de la pradera naturalizada presentaron variaciones estacionales, las cuales están asociadas al estado fenológico de la planta (Figura 31).

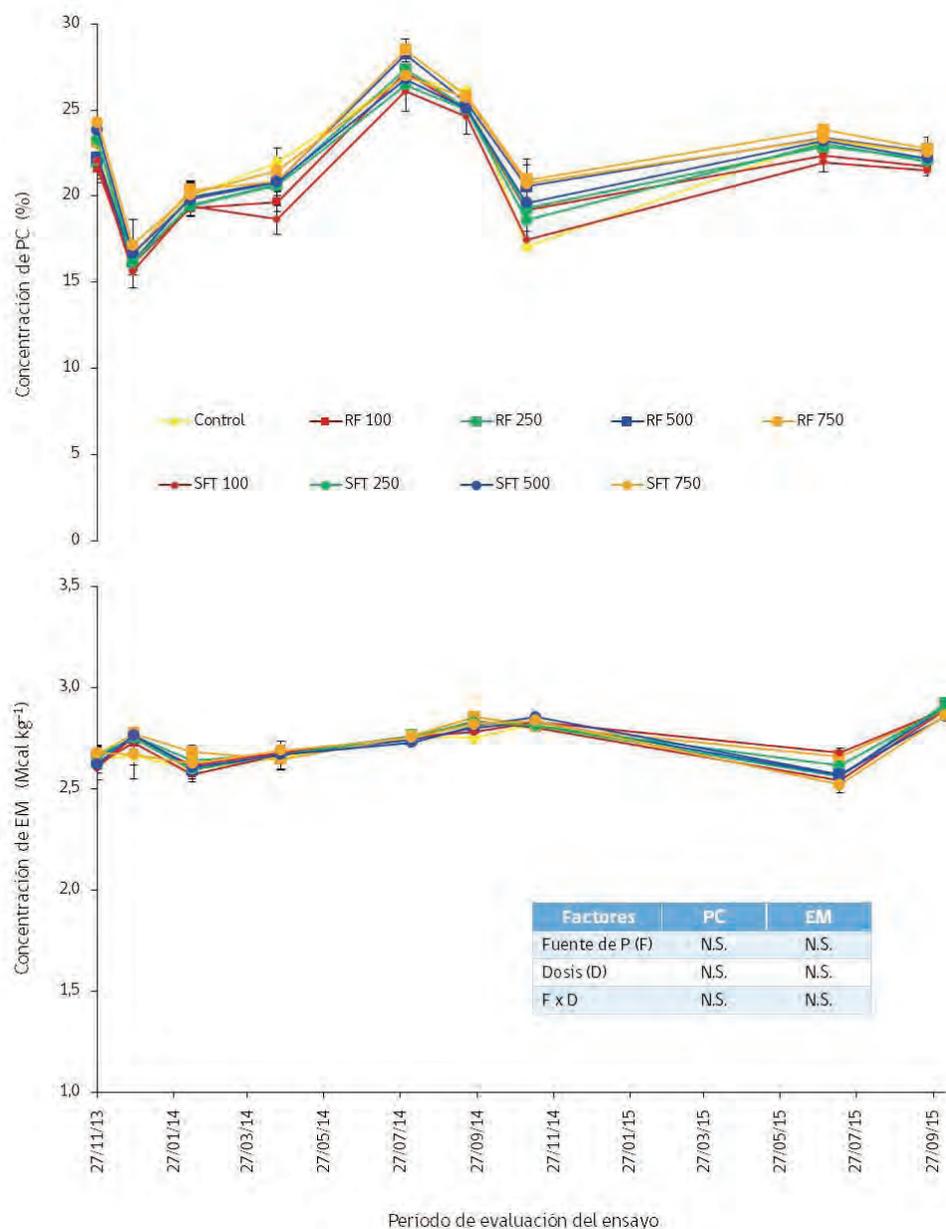


Figura 31. Efecto de la interacción tratamiento y momento de corte sobre la concentración foliar de proteína cruda y energía metabolizable en una pradera naturalizada en Fresa. Período: septiembre de 2013 a octubre de 2015.

En el año 1, independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado, sólo en primavera y con las dosis más altas de P_2O_5 ha^{-1} en verano y otoño la pradera naturalizada es capaz de proporcionar PC según los requerimientos (Figura 31). En invierno, sólo las dosis más altas de P_2O_5 ha^{-1} del fertilizante fosfatado insoluble (RF) generó el mismo efecto anterior.

En el año 2, los límites de requerimiento de PC se reducen a primavera y otoño, independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado. Estos resultados indican que las praderas naturalizadas con adecuadas dosis de fertilización fosfatada de corrección pueden proporcionar un aporte proteico adecuado durante todo el año, por lo tanto, la continuidad en el manejo de la fertilización fosfatada no solo incrementará la producción de la pradera naturalizada sino que también su calidad mineral y calidad nutritiva.

En cambio, la concentración foliar de EM mostró mayores variaciones durante las distintas épocas del año 2 (Figura 31). Sin embargo, los tratamientos evaluados presentaron niveles de EM sobre el límite de requerimiento de la pradera naturalizada a través de todo el año (año 1 y año 2).

8.1.4.6 Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en la pradera naturalizada

En la Figura 32 se observa que existe una relación directa entre la absorción de P y la producción acumulada total de materia seca (MS) de la pradera naturalizada, donde los

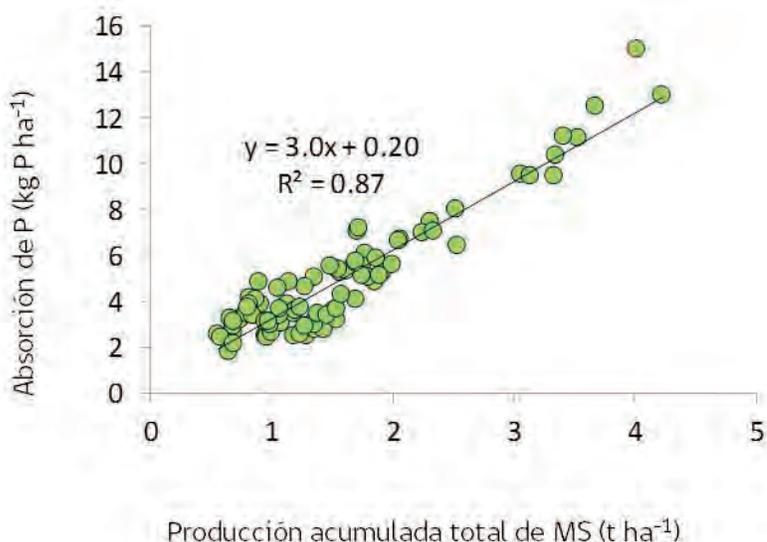


Figura 32. Relación entre la absorción de fósforo y la producción acumulada total de materia seca en una pradera naturalizada en Fresia.

mayores rendimientos acumulados de MS se relacionan con las mayores absorción de P con un ajuste de $R^2 = 0,87$.

Considerando el ajuste lineal obtenido, se generó un factor de demanda de fósforo de 3,0 kg P t MS producida.

8.1.4.7 Efecto de la fertilización fosfatada de corrección en los parámetros del suelo de la pradera naturalizada

El efecto de los tratamientos en la respuesta del suelo bajo pradera naturalizada fue significativa ($p < 0,05$, Cuadro 22) con las concentraciones de P disponible determinadas por las metodologías Olsen (P Olsen) y resina de intercambio iónico (P Resina).

En el Cuadro 23, se observan algunos parámetros del suelo, medidos al finalizar el ensayo de campo (28 de septiembre de 2015).

El pH en agua inicial del suelo fue moderadamente ácido ($5,9 \pm 0,03$; Cuadro 20) y la concentración inicial de P Olsen presentó un rango medio ($11 \pm 3,24$ mg kg⁻¹, Cuadro 20). Los valores de pH en agua, disminuyeron en 0,01 a 0,02 unidades en relación al pH en agua inicial del suelo; esta disminución se puede atribuir a la variación generada por la época de muestreo. Además, estos valores de pH en agua indican una condición ideal ($pH < 5,8$) para una adecuada respuesta del fertilizante fosfatado insoluble (RF), bajo dicha condición predomina la forma $H_2PO_4^-$ (Linsay, 1979) que es absorbible por la pradera naturalizada desde la solución del suelo.

Cuadro 22. ANDEVA del efecto de los tratamientos sobre los parámetros del suelo al término del ensayo de campo en Fresa.

Factores	pH agua	P Olsen	P Resina
Fuente de P (F)	N.S.	**	**
Dosis (D)	N.S.	**	**
F x D	N.S.	**	**

No se observó un efecto de los tratamientos sobre los valores de pH en agua ($p > 0,05$; Cuadro 23), coincidiendo con estudios realizados por Siebald *et al.* (1999).

La aplicación de las diferentes dosis de fertilizante fosfatado generó diferencias significativas en las concentraciones de P Olsen y P Resina en el suelo ($p < 0,05$; Cuadro 23), observándose que la dosis de SFT 750 kg P₂O₅ ha⁻¹ aumentó significativamente las concentraciones de P Olsen y P Resina en el suelo entre 24 y 45 mg P kg⁻¹, respectivamente.

Por otro lado, la concentración de P Olsen disminuyó a 9 y 10 mg kg⁻¹ con los tratamientos control y RF 100 mg kg⁻¹, RF 250 mg kg⁻¹ (Cuadro 23); disminución que puede ser atribuida

a la absorción de P por parte de la pradera naturalizada o a los procesos de adsorción de P por los complejos Al-Humus y Fe-humus presentes en la superficie coloidal de los suelos Trumaos (Andisoles), según los estudios realizados por Vistoso *et al.* (2012).

La aplicación de dosis $\geq 500 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ aumentó la concentración de P Olsen en 3 y 4; 17 y 24 mg kg^{-1} con la aplicación de los fertilizantes fosfatados RF y SFT, respectivamente, en relación al P Olsen inicial en el suelo (Cuadros 20 y 23).

La aplicación de las dosis SFT $500 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ y SFT $750 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ generó concentraciones de P Olsen adecuadas (20-25 mg kg^{-1} ; Teuber, 2009) para la producción de la pradera naturalizada, considerando que este suelo presentó un nivel inicial medio de P (Cuadro 20); debido a la mayor solubilidad del SFT.

Sin embargo, la RF, de entrega lenta de P por su menor solubilidad, en comparación con el SFT, es una fuente alternativa de aplicación directa de P en suelos ácidos, más económica y que contribuye a la intensificación agrícola sustentable de especies de ciclo vegetativo largo como las praderas que requieren suministros constantes de P para su crecimiento, desarrollo y producción, manteniendo la fertilidad del suelo e incluso mejorando la concentración de P a largo plazo.

Por su parte, la dosis SFT $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ mantuvo la concentración de P Olsen inicial del suelo y las dosis SFT $250 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ a $750 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ aumentaron la concentración de P Olsen entre 4 a 24 mg kg^{-1} .

Las concentraciones de P Resina fluctuaron entre 19 a 36 mg kg^{-1} (Cuadro 23) con la aplicación de las diferentes dosis de RF y entre 22 a 56 mg kg^{-1} con la aplicación de SFT, indicando un rango muy bajo a medio de P en la solución del suelo (Saggar, 2016 comunicación personal).

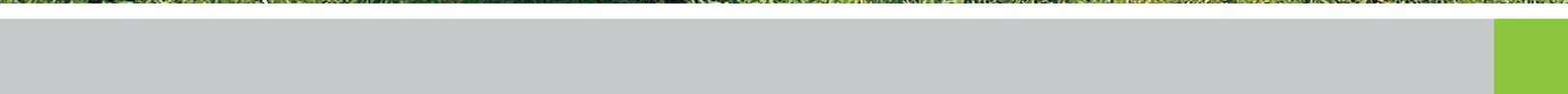
Cuadro 23. Efecto de la fertilización de corrección sobre algunos parámetros del suelo a término del ensayo de campo en Fresia. Fecha: 28/09/15. (n=3)

Tratamiento	pH Agua	P Olsen	P Resina
		(mg kg ⁻¹)	
Control	5,7 a	9 c	17 d
RF 100	5,8 a	10 c	19 d
RF 250	5,8 a	10 c	24 cd
RF 500	5,8 a	14 bc	29 cd
RF 750	5,8 a	15 bc	36 bc
SFT 100	5,8 a	11 c	22 cd
SFT 250	5,8 a	15 bc	29 cd
SFT 500	5,7 a	28 ab	44 ab
SFT 750	5,7 a	35 a	56 a

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos, según prueba Tukey ($p < 0,05$).

Capítulo 9

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTE FOSFATADO EN PRADERAS



Se consideraron los valores unitarios de todos los fertilizantes utilizados en cada ensayo de campo en particular que correspondieron a precios de mayo de 2016 sin IVA y obtenidos a nivel de proveedores de insumos agrícolas de la Región de Los Lagos.

Posteriormente, se determinó el costo por unidad de materia seca, MS (\$/kg MS) bajo dos condiciones:

- i) En el año 1 como respuesta inmediata a la aplicación de la fertilización base y de los tratamientos de la fertilización fosfatada y,**
- ii) En el año 2 como respuesta inmediata a la aplicación de la fertilización base y al efecto residual de la fertilización fosfatada (aplicada en el año 1).**

La determinación de los costos de producción constituye una base esencial para la toma de decisiones por parte del productor. En este sentido y para contribuir a la mejor toma de decisiones se presenta la estructura de costos directos de producción de MS de las praderas evaluadas.

Se consideraron como fuentes de P un fertilizante fosfatado insoluble (Roca fosfórica, RF: 28,9% P_2O_5) y un fertilizante fosfatado soluble (Superfosfato triple, SFT: 45% P_2O_5).

9.1 Evaluación económica de la fertilización fosfatada de mantención en una pradera permanente

Bajo la condición de un suelo con alto nivel de P inicial (Cuadro 8), se consideró un manejo de fertilización fosfatada de mantención con bajas dosis de P_2O_5 (Cuadro 6).

Como se observa en la Figura 33, en términos de costos relativos, al fertilizar el primer año con una fuente de fósforo soluble (SFT) el costo por kilo de MS disminuyó un 5% al aplicar 50 kg P_2O_5 ha⁻¹, posteriormente en la medida que se incrementó la dosis de P_2O_5 se incrementó el costo levemente hasta alcanzar un 8% más por sobre el tratamiento control (sin P), cuando se aplicó una dosis de 200 kg P_2O_5 ha⁻¹.

Por otro lado, cuando se aplicó una fuente de fósforo insoluble (RF) en dosis equivalente a 50 kg P_2O_5 ha⁻¹, el costo por kilo de MS disminuyó en 8% respecto al tratamiento control, sin embargo, al aumentar las dosis de P_2O_5 el costo se incrementó con la aplicación de SFT, alcanzando un 19% por sobre el tratamiento control, cuando se aplicó una dosis de 200 kg P_2O_5 ha⁻¹ (Figura 33).

En el segundo año, en que la pradera permanente no recibió la aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de mantención (sólo se aplicó la fertilización basal), la respuesta productiva fue de menor magnitud lo cual incide en un incremento del costo por kg de MS.

En términos generales, durante el primer año después de la aplicación de los diferentes tratamientos de fertilización fosfatada de mantención se obtuvo un costo de MS de \$29 (fluctuando entre \$25 a \$31) y durante el segundo año después de la aplicación de los diferentes tratamientos de fertilización fosfatada de mantención, el costo aumentó a \$40 (fluctuando entre \$35 a \$44).

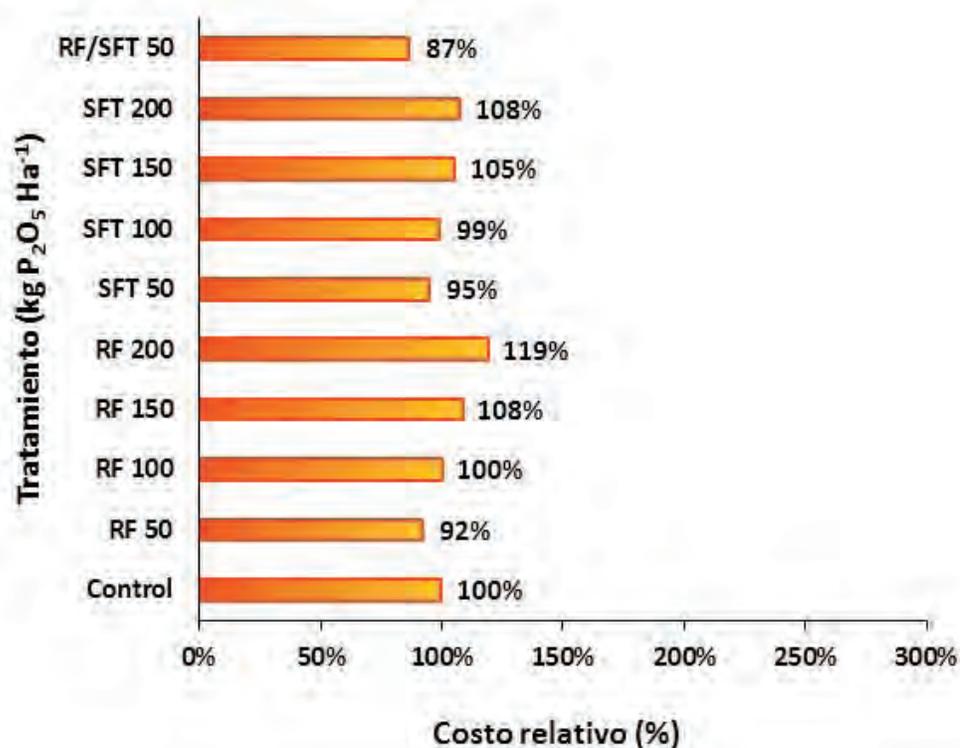


Figura 33. Costo relativo de producción de materia seca en una pradera permanente después de un año de aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de mantención en Remehue.

En la Figura 34, se observa el costo relativo de producción de MS de la pradera permanente después de dos años de aplicados los tratamientos de fertilización fosfatada de mantención, indicando que el costo por kg de MS disminuyó entre 25% a 40%, siendo esta disminución mayor en la medida que se incrementó la dosis de P₂O₅.

En el caso de la RF, en la medida en que se incrementó la dosis de P₂O₅ el costo por kg de MS disminuyó a valores que fluctuaron entre 14% a 40%, cuando se aplicaron 50 y 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Figura 34).

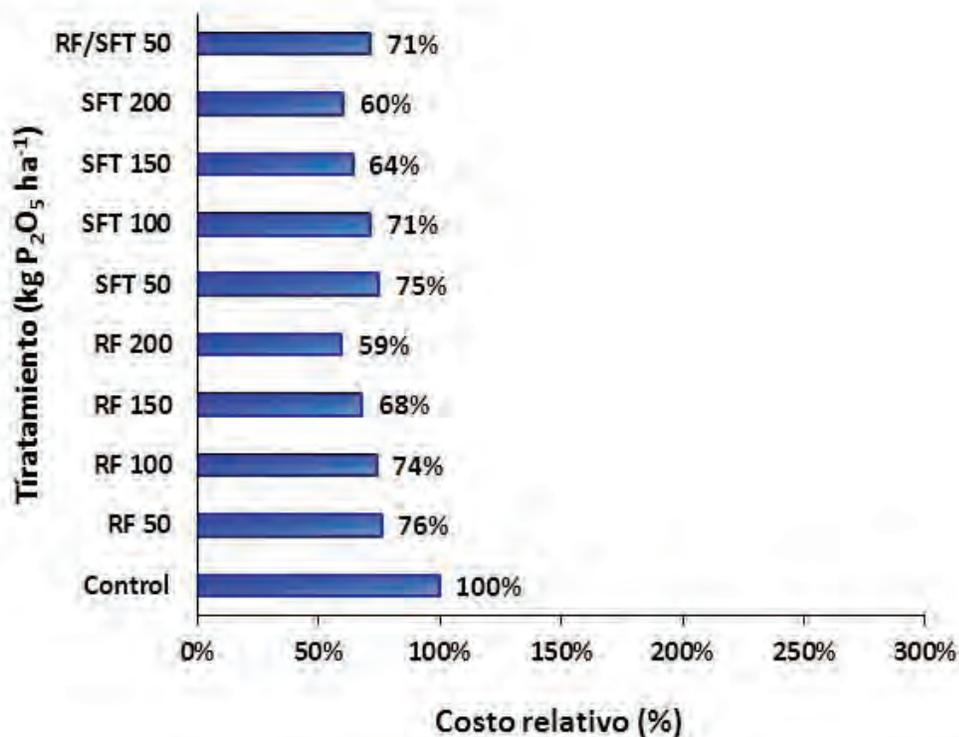


Figura 34. Costo relativo de producción de materia seca en una pradera permanente después de dos años de aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de mantención en Remehue.

9.2 Evaluación económica de la fertilización fosfatada de establecimiento en una pradera de ballica

Bajo la condición de un suelo con medio-alto nivel de P inicial (Cuadro 14), se consideró un manejo de fertilización fosfatada de establecimiento con dosis medias de P₂O₅ (Cuadro 12).

En el primer año, después de aplicados los tratamientos en la pradera de ballica, el costo de MS promedio fue de \$27 (fluctuando entre \$29 a \$23), mientras que en el segundo año después de la aplicación de la fertilización fosfatada de establecimiento este costo disminuyó a \$15 (fluctuando entre \$14 a \$18).

Bajo la condición de un suelo con medio-alto nivel de P inicial, está la opción de establecer una pradera de ballica donde surge la interrogante de determinar el efecto de la aplicación de la fertilización fosfatada con fuentes de fósforo con diferentes solubilidades.

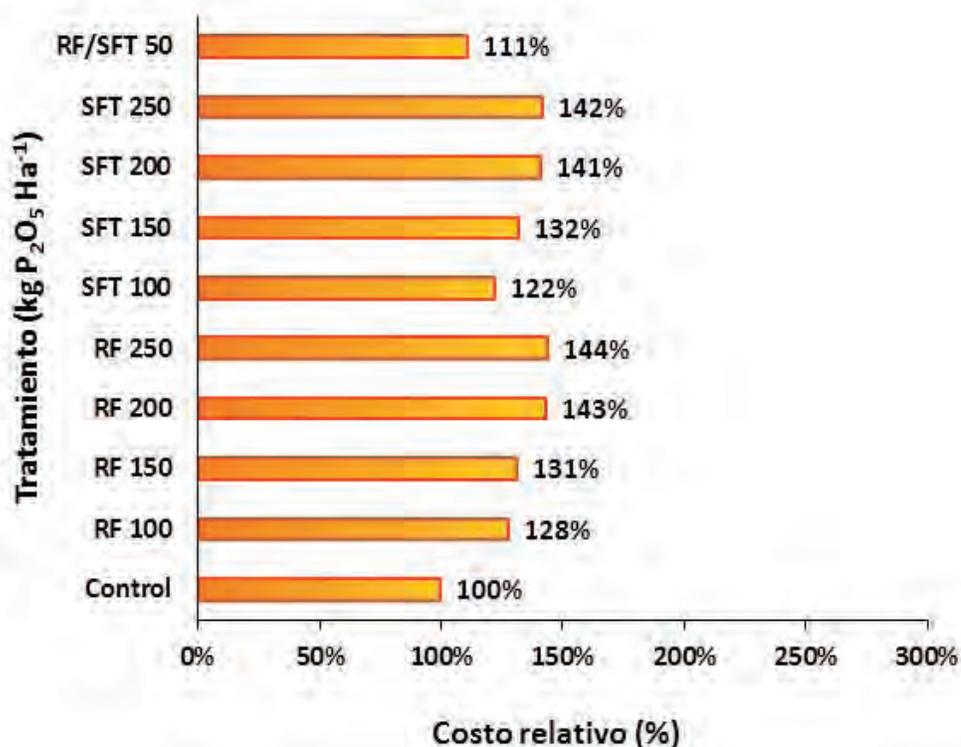


Figura 35. Costo relativo de producción de materia seca de una pradera de ballica después de un año de aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de establecimiento en Purranque.

Al establecer una pradera de ballica con la aplicación de fuente de fósforo como Superfosfato triple (SFT) o Roca fosfórica (RF), se determinó que el costo por kg de MS aumentó en la medida en que se incrementó la dosis de P₂O₅, sin embargo, dicho costo fue similar a igual dosis P₂O₅, independientemente de la fuente de P aplicada.

En términos generales, se incrementó el costo entre 22% a 44% con la aplicación de dosis de 100 y 250 kg P₂O₅ ha⁻¹, respectivamente (Figura 35).

Como se observa en la Figura 36, después de dos años de aplicados los tratamientos, el costo de la MS de la pradera de ballica disminuyó entre 10% y 16% en los tratamientos donde se aplicó RF en el año 1.

Mientras tanto, la pradera de ballica donde se aplicaron los tratamientos con SFT, el costo disminuyó entre 10% y 12%. En términos generales, la disminución en el costo de MS es similar a igual dosis de P₂O₅.

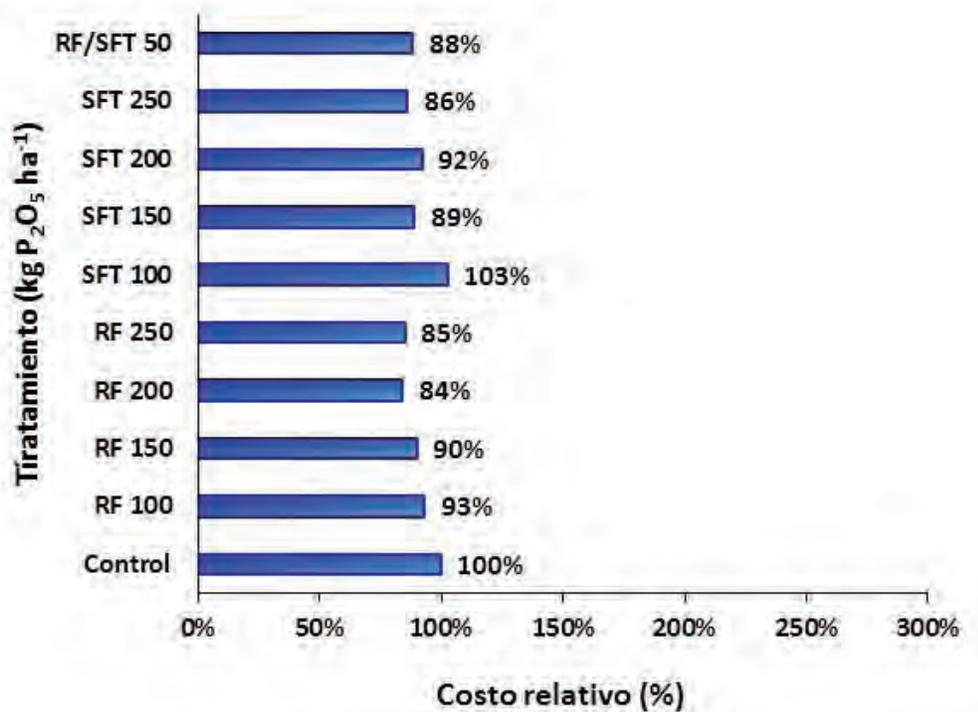


Figura 36. Costo relativo de producción de materia seca en una pradera de ballica después de dos años de aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de establecimiento en Purranque.

9.3 Evaluación económica de la fertilización fosfatada de corrección en una pradera naturalizada

Bajo la condición de un suelo deficitario de P inicial (Cuadro 20), se consideró un manejo de fertilización fosfatada de corrección con altas dosis de P₂O₅ (Cuadro 18).

Considerando este manejo de fertilización fosfatada de corrección, el costo por kg de MS al aplicar RF se incrementó entre 36% a 185% con la aplicación de dosis de 100 y 750 kg P₂O₅ ha⁻¹.

A su vez, con aplicaciones de SFT, este costo aumentó entre 36% y 168% con similares dosis de P₂O₅ (Figura 37).

En términos generales, a igual dosis de P₂O₅ el incremento en el costo por kg de MS es similar para ambas fuentes de P aplicadas.

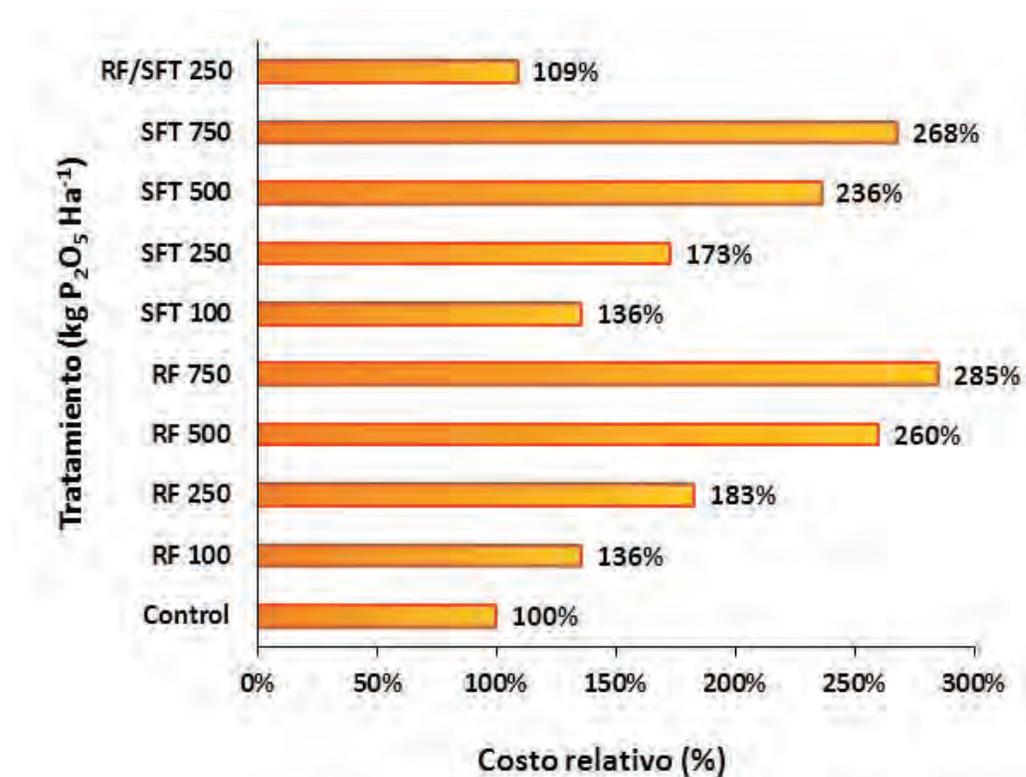


Figura 37. Costo relativo de producción de materia seca en una pradera naturalizada después de un año de la aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de corrección en Fresia.

En el primer año, después de aplicados los tratamientos a la pradera naturalizada, se observó un costo de producción de MS de \$56 (fluctuando entre \$31 a \$80).

Posteriormente, en el segundo año la producción de MS disminuyó, condición que generó una disminución en los costos de producción de MS a \$34 (fluctuando entre \$28 a \$40).

En la Figura 38, se observa que el costo de producción de MS disminuyó entre 14% y 36% después de dos años de la aplicación de los tratamientos con RF.

A su vez, la aplicación de los tratamientos con SFT disminuyó entre 8% y 30% el costo de MS. En términos generales, se observó una mayor disminución con la aplicación de RF a igual dosis de P₂O₅.

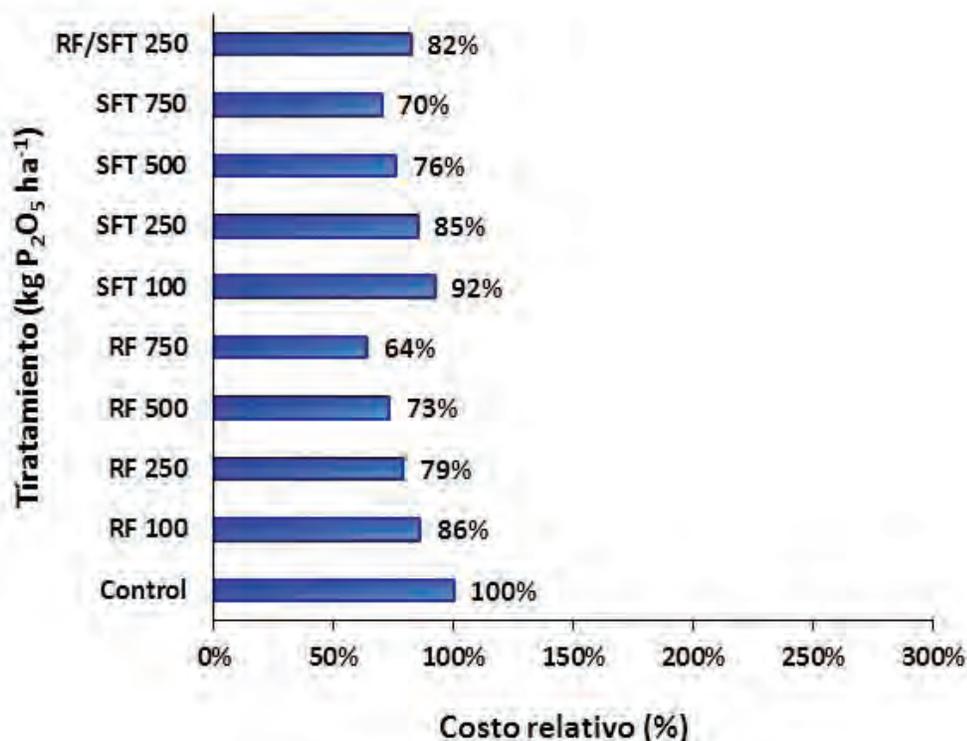


Figura 38. Costo relativo de producción de materia seca en una pradera naturalizada después de dos años de aplicación de los tratamientos de fertilización fosfatada de corrección en Fresia.

9.4 Impacto de la fuente de fósforo en la producción de materia seca y costos asociados

Ante la opción de aplicar RF en lugar de SFT (Cuadro 24), podemos observar que la disminución en la producción de MS no resulta significativa con la aplicación de fertilización fosfatada de mantención en una pradera permanente y fertilización fosfatada de establecimiento en una pradera de ballica, bajo suelos con alto y medio-alto nivel de P inicial (23 y 18 ppm o mg kg⁻¹, respectivamente).

A su vez, la aplicación de dosis de fertilización fosfatada de mantención de 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ fue un 10% más económica al aplicar RF que SFT.

Por otro lado, la aplicación de fertilización fosfatada de corrección sobre un suelo con deficitario nivel de P inicial (11 ppm o mg kg⁻¹) como RF incrementó los costos de producción de MS entre 5% a 9% independientemente la dosis de P₂O₅, por lo tanto, el impacto en la producción de MS de la pradera naturalizada fue sólo marginal (Cuadro 24).

Cuadro 24. Impacto en la producción de materia seca (kg MS ha⁻¹) y en los costos (%) al fertilizar con Roca fosfórica respecto al Superfosfato triple.

Tipo de fertilización fosfatada	Dosis	Diferencia	
	(kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	(kg MS ha ⁻¹)	Costo (%)
Mantenición	50	+328	-3
	100	+73	+1
	150	-77	+3
	200	-740	+10
Establecimiento	100	-360	+5
	150	+350	-1
	200	+112	+1
	250	+151	+1
Corrección	100	+126	0
	250	-168	+5
	500	-427	+9
	750	-124	+5



Capítulo 10

CONCLUSIONES



Implementación y validación de metodologías analíticas en INIA Remehue:

En INIA Remehue, se implementaron y validaron metodologías para determinar la solubilidad en fertilizantes fosfatados y una metodología para determinar el fósforo disponible en suelo, las cuales presentaron alta exactitud y precisión, sugiriendo las metodologías de extracción con agua y/o solución en citrato de amonio neutro a pH 7,0 para determinar la solubilidad en fertilizantes fosfatados solubles y con solución de ácido cítrico al 2% en fertilizantes fosfatados insolubles y, la metodología de la resina de intercambio iónico para ser utilizada en la determinación de fósforo disponible en suelo Trumao.

Determinación de la solubilidad en los fertilizantes fosfatados evaluados:

El 21% de los fertilizantes fosfatados solubles evaluados presentaron solubilidades < 84% del total de P_2O_5 , se sugiere considerar este valor en el cálculo de la dosis de fertilización fosfatada.

La totalidad de los fertilizantes fosfatados insolubles presentaron solubilidades < 52% del total de P_2O_5 .

Caracterización química en los fertilizantes fosfatados evaluados:

Se encontraron diferencias en la concentración de P_2O_5 (P total) en lo que reporta la etiqueta del fertilizante y la concentración determinada en laboratorio. Se sugiere determinar el origen de estas diferencias a través de un estudio de composición de fertilizantes (N-P-K) para dimensionar el problema y generar soluciones.

Se encontraron concentraciones de arsénico, cadmio, cromo, plomo y selenio en los fertilizantes fosfatados evaluados. Estas concentraciones están por sobre el límite aceptado en países desarrollados. Al respecto, Chile necesita legislar en esta materia para establecer los máximos umbrales de metales pesados a aceptar en los fertilizantes fosfatados.

Evaluación del fósforo disponible en suelo:

La comparación entre dos metodologías para determinar el P disponible, indica que en suelos Trumao con alta y media-alta concentración de P inicial, sólo la metodología de la resina de intercambio iónico discrimina el efecto de dosis baja a media de P_2O_5 . En cambio, en suelos Trumao, con deficitaria concentración de P inicial y con altas dosis de aplicación de P_2O_5 , ambos métodos reflejan el P disponible en suelo.

La metodología de la resina de intercambio iónico es un buen predictor de la variación en producción de la pradera y de la concentración de P disponible en suelo, sugiriéndola como herramienta de evaluación del P disponible en suelo Trumao independiente de la solubilidad del fertilizante fosfatado aplicado.

Ensayos de Campo:

La producción de materia seca de las praderas evaluadas en las localidades de Remehue, Purranque y Fresia fue afectada significativamente por la dosis de P_2O_5 , la época de corte y la interacción dosis y época de corte. No existieron diferencias significativas en la producción de materia seca por efecto del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

Los parámetros de calidad mineral (concentración foliar de fósforo) y calidad nutritiva (proteína cruda y energía metabolizable) de las praderas evaluadas fueron afectados principalmente por la época de corte, y no por las dosis de P_2O_5 o fuentes de fósforo utilizadas, producto de la variación estacional en las localidades de Remehue, Purranque y Fresia.

La absorción de fósforo está directamente relacionada con la producción de materia seca en las praderas evaluadas. Se generó un factor de demanda de fósforo que fluctuó entre 2,5 y 3,0 kg P /tonelada de materia seca de forraje producido.

Las concentraciones de P disponible (P Olsen) se incrementaron significativamente en función de las dosis > 200 kg P_2O_5 ha⁻¹ de fertilización fosfatada de corrección con el fertilizante fosfatado soluble. En cambio, las concentraciones de P disponible (P Resina) se incrementaron significativamente en función de las dosis de P_2O_5 , independientemente del tipo de fertilizante fosfatado aplicado.

Evaluación económica de la fertilización fosfatada de las praderas evaluadas:

En suelos Trumaos de alta y media-alta fertilidad (P Olsen inicial: 23 y 18 mg kg⁻¹), el tipo de fuente de fósforo que se utilice para la fertilización fosfatada de mantención o fertilización fosfatada de establecimiento de praderas no afecta el costo de la materia seca. En suelos Trumaos de deficitaria fertilidad (P Olsen inicial: 11 mg kg⁻¹), donde se requiere una fertilización fosfatada de corrección, el uso de roca fosfórica incrementa entre 5% y 9% el costo de producción de materia seca.



Capítulo 11

SUGERENCIAS

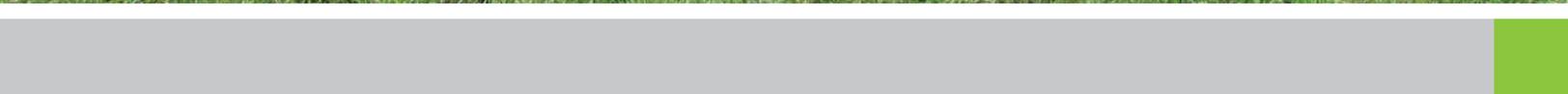


Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser usados como antecedentes para solicitar a diferentes fuentes de financiamiento de investigación su priorización y apoyo de iniciativas en los siguientes temas:

- Debido al potencial impacto de los metales pesados en la contaminación de los suelos bajo pradera a largo plazo, es relevante evaluar la disponibilidad de metales pesados de los fertilizantes fosfatados y, su posible traspaso y acumulación en el sistema suelo-planta-animal. Esto permitiría establecer umbrales de metales pesados que podrían ser perjudiciales en los suelos agrícolas.
- Se recomienda establecer umbrales de fósforo disponible en el suelo (determinados con el método Olsen, P Olsen y el método de la resina de intercambio iónico, P Resina) por sobre el cual no existe respuestas a la fertilización fosfatada. Esto permitiría diferenciar suelos que requerirían de fertilización de mantención o fertilización de corrección.
- Se sugiere realizar más evaluaciones del comportamiento y calibración de la metodología de la resina de intercambio iónico en la determinación de fósforo disponible en el suelo bajo otras condiciones edafoclimáticas.
- Se sugiere realizar un estudio cuyo objetivo sea detectar las posibles diferencias entre lo que reporta el etiquetado de los fertilizantes y los valores reales de concentración de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), para detectar las debilidades y generar soluciones para los sistemas de producción agropecuaria y venta de fertilizantes.

Capítulo 12

ESTRATEGIAS PARA ENFRENTAR LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO EN EL SUELO



Las praderas permanentes, al igual que los cultivos anuales, necesitan un adecuado balance y disponibilidad de nutrientes esenciales en la solución del suelo para expresar su productividad y persistencia.

Considerando las propiedades químicas de los suelos Trumaos, se han establecido diferentes niveles óptimos de parámetros de fertilidad para la mantención de praderas, los cuales se presentan en el Cuadro 25:

Cuadro 25. Niveles óptimos de parámetros de fertilidad para la mantención de praderas en suelos Trumaos.

Parámetro	Nivel óptimo de fertilidad
pH en agua	5,6 - 5,8
Fósforo, P (mg kg ⁻¹)	20 - 25
Azufre, S (mg kg ⁻¹)	20 - 25
Calcio, Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	9 - 13
Magnesio, Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	1,0 - 2,5
Potasio, K (cmol(+) kg ⁻¹)	0,5 - 0,8
Sodio, Na (cmol(+) kg ⁻¹)	0,2 - 0,5
Suma de bases intercambiables (cmol(+) kg ⁻¹)	11 - 16
Aluminio, Al (cmol(+) kg ⁻¹)	< 0,25
Saturación de aluminio (%)	< 3

Fuente: Teuber (2009).

Teuber y Romero (2004), indican que los niveles óptimos de fertilidad de un suelo se pueden alcanzar con la incorporación de cultivos anuales previo al establecimiento de especies pratenses o a través de un plan de manejo de mejoramiento del suelo de pradera establecida (prácticas de manejo y fertilización de mantención en cobertera).

Las estrategias para enfrentar esta deficiencia de P implica considerar fertilizaciones de corrección para incrementar la concentración de P disponible en el suelo hasta un nivel determinado (por ejemplo: 25 mg P Olsen/kg) y fertilizaciones de mantención para mantener, a través del tiempo, la concentración de P disponible en el suelo, que es adecuada para sostener la productividad de la pradera.

En los suelos de pradera con un nivel bajo (5 a 10 ppm o mg kg⁻¹) de concentración de P disponible, se recomienda realizar una fertilización fosfatada de corrección para alcanzar un adecuado suministro de P en el suelo (Cuadro 26) en un período de dos a tres años.

Por su parte, en suelos de pradera de nivel medio de concentración de P disponible (10 a 20 ppm o mg kg⁻¹), se requerirá corregir gradualmente la deficiencia de P del suelo para alcanzar el nivel óptimo de P en el suelo (Cuadro 26).

Posteriormente, se deben realizar aplicaciones de fertilización fosfatada de mantención con el objeto de reponer el P exportado desde el potrero. La fertilización de mantención implica reponer el P que es exportado del potrero a través de los productos cosechados (como forraje y/o carne y/o leche).

Al realizar los cálculos de la fertilización fosfatada de praderas, debemos considerar la capacidad tampón del P del suelo (CP), tipo de fertilizante fosfatado a aplicar y parámetros de acidez del suelo, tales como: pH en agua y porcentaje de saturación de aluminio.

En el Cuadro 26 se presentan los rangos de P_2O_5 recomendados para incrementar en 1 ppm o $mg\ kg^{-1}$ la concentración de P en diferentes tipos de suelos volcánicos de praderas de la Región de Los Lagos.

Cuadro 26. Capacidad tampón de P_2O_5 en suelos volcánicos de praderas de la Región de Los Lagos (estrata 0-10 cm).

Tipo de suelo	P Olsen inicial ($mg\ kg^{-1}$)	
	1 - 9	10 - 14
	kg de P_2O_5 / mg	
Trumao (Provincias: Osorno, Llanquihue y Palena)	37	32
Trumao (Provincia de Chiloé)	41	34
Rojo Arcilloso	27	23
Transición	30	25
Ñadi	39	34

Fuente: Undurraga (2000).

¿Cómo seleccionar un fertilizante fosfatado?

En general, la selección del fertilizante fosfatado para corregir las deficiencias de P en los suelos es función de los siguientes factores:

- i) **Propósito de la aplicación del fertilizante fosfatado**
- ii) **Tipo de cultivo o pradera a ser fertilizada**
- iii) **Suministro de P del suelo**
- iv) **Reacción del suelo (pH en agua)**
- v) **Precipitación promedio del área geográfica (localidad)**
- vi) **Requerimiento de otros nutrientes esenciales**
- vii) **Costo del fertilizante fosfatado (asociados a su transporte y aplicación)**

Los fertilizantes fosfatados de liberación rápida de las formas de P disponibles, se deben aplicar cuando el objetivo es incrementar rápidamente la concentración de P del suelo. Por ejemplo: cuando en un suelo deficiente en P, se aplican fertilizantes fosfatados solubles (liberación rápida de P), para que las plantas de cultivo o especies pratenses se establezcan rápidamente.

En la aplicación de fertilizantes fosfatados para la mantención de praderas, la velocidad de liberación de P disponible es menos relevante, por lo tanto, sus costos de transporte y aplicación son los factores a considerar en su selección.

Los criterios para seleccionar un fertilizante fosfatado soluble (FFS) o un fertilizante fosfatado insoluble (FFI) a aplicar en el suelo, se presentan en el Cuadro 27:

Cuadro 27. Criterios de selección del tipo de fertilizante fosfatado para su aplicación al suelo.

Fertilizante fosfatado soluble	Fertilizante fosfatado insoluble
Se requiere una rápida respuesta en la planta (cultivos de ciclo vegetativo corto, como los cultivos anuales).	No se requiere una rápida respuesta en la planta (cultivos de ciclo vegetativo largo, como las praderas o frutales)
Se requiere incrementar rápidamente la concentración de P en el suelo.	Se requiere incrementar lentamente la concentración de P en el suelo.
Suelos con pH agua > 5,8 y baja concentración de P.	Suelos con pH agua < 5,8 y media a alta concentración de P.
No existe riesgo de escurrimiento en el suelo.	Si existe riesgo de escurrimiento en el suelo.

La excepción a la regla la constituyen los fertilizantes fosfatados insolubles (liberación lenta de P) que son una fuente de P más económica. Sin embargo, se disuelven lentamente en suelos con pH > 6,0 o en áreas geográficas con precipitación < 800 mm año⁻¹. En cambio, en los suelos ácidos (pH en agua < 5,8) y climas más húmedos dependerá de la granulometría (tamaño de partículas) del fertilizante fosfatado insoluble.

Estudios realizados, por Hedley y Bolan (1997), en suelos neocelandeces indican que los fertilizantes fosfatados insolubles se disuelven a una tasa de 20% a 30% por año y que después de aplicarlos durante 3 o 4 años, la concentración de P disponible anualmente para la planta es la misma que cuando se aplica una dosis igual de P con fertilizante fosfatado soluble (SFT); debido a que el P del fertilizante fosfatado insoluble que se aplicó, pero que no se disolvió en los primeros 2 ó 3 años, se disolverá en los años siguientes.

La disolución gradual de este tipo de fertilizante fosfatado insoluble suministra el P disponible para la planta a una tasa similar a la cual las especies pratenses absorben el P a través de sus raíces, de forma que la concentración de P en la solución del suelo permanece razonablemente constante (Cornforth, 1990). Por el contrario, los fertilizantes

fosfatados solubles que se disuelven rápidamente generan una alta concentración de P en la solución del suelo *post* su aplicación.

Entre las consecuencias de esta alta concentración de P en la solución del suelo inmediatamente después de la aplicación de los fertilizantes fosfatados solubles (liberación rápida de P) es que las raíces de las plantas absorben más P del que la planta requiere para un crecimiento máximo (consumo de lujo). Si bien no daña a la pradera, en el ganado que pastorea praderas ricas en P aumenta la concentración de P en las heces y, como resultado, aumenta la concentración de P perdido por la transferencia de estiércol a los campos, caminos y patios. Debemos tener presente, que la pérdida de P desde pool del ciclo del P en el suelo (Figura 3) aumentará automáticamente los requerimientos de fertilización fosfatada de mantención.

¿Cuándo y cómo aplicar los fertilizantes fosfatados al suelo?

La fertilización fosfatada de praderas (mantención y corrección), deberá ser aplicada en dosis de P_2O_5 parcializadas durante el otoño (40%) y la primavera (60%), de acuerdo a la Figura 39.



Figura 39. Época de aplicación de los fertilizantes fosfatados al suelo. Fuente: Adaptado de Teuber (2009).

Los factores a considerar en la aplicación de los fertilizantes fosfatados son:

- i) Concentración de P disponible en el suelo,**
- ii) Tipo de cultivo o pradera a fertilizar y,**
- iii) Prácticas de manejo.**

Debido a la alta capacidad de adsorción de P de los suelos volcánicos (ver página 18) y su escasa movilidad en el suelo, el fertilizante fosfatado debe ser localizado cerca de la semilla durante la labor de siembra, lugar donde las raíces de las especies forrajeras aumentan su eficiencia de absorción de P (Figura 40). Por ello, su colocación en bandas es la forma agronómica más eficiente en suelos de baja fertilidad fosfatada.



Figura 40. Aplicación de fertilizante fosfatado en el surco de siembra.

Las aplicaciones de fertilizante fosfatado en cobertera, al final de la época invernal, promueven la producción de pradera en la época primaveral (Rodríguez, 1993). En la práctica de manejo de regeneración de praderas, la aplicación de fertilizantes a finales del invierno en cobertera y su incorporación en la última labor de rastraje permitirá una mayor área de contacto del fertilizante fosfatado que asegure su reacción con el suelo.

Las características del fertilizante fosfatado (solubilidad, granulometría) determinan el grado de adsorción del P en el suelo. Por ello, a mayor solubilidad y menor granulometría (tamaño de las partículas) del fertilizante fosfatado mayor es su grado de adsorción en el suelo.

En la fertilización fosfatada de corrección de praderas se deberán preferir los fertilizantes fosfatados de mayor solubilidad, en cambio, en la fertilización fosfatada de mantención de praderas se pueden aplicar fertilizantes fosfatados de entrega lenta (RF), considerando en ambos casos, períodos con adecuadas condiciones climáticas (Figura 38).

LITERATURA CITADA

- Adriano, D. 2001.** Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals. 2st edn (ed. A. Adriano). Springer-Verlag, New York, USA. 867p.
- Anrique, R.; Fuchlocher, R.; Iraira, S. y Saldaña, R. 2008.** Composición de alimentos para el ganado bovino. (ed. FIA). Universidad Austral de Chile. 87p.
- AOAC INTERNATIONAL, 2007.** Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. Disponible en: <http://www.aoac.org>.
- APFCO, 2003.** Statement of Uniform Interpretation and Policy (SUIP) #25. «The Heavy Metal Rule» of the Association of American Plant Food Control Officials. Disponible en: <http://www.aapfco.org/rules.html>.
- Barrow, N. 1984.** Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. *Journal of Soil Science*. 35: 283-297.
- Benton, J.; Wolf, B. and Mills, H. 1991.** Plant analysis handbook. 1. Methods of plant analysis and interpretation. Micro-Macro Publishing, Inc. Georgia, USA. 213p.
- Bernier, R. 1982.** Fertilización de praderas. II Deficiencias nutricionales de los suelos de la X Región. Boletín Técnico N° 58. INIA. Estación Experimental Remehue. Osorno, Chile. 14p.
- Besoain, E. 1985.** Los suelos. En: Suelos Volcánicos de Chile, (ed J. Tosso), Capítulo 1, pp. 25-106. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Besoain, E. & Sepúlveda, G. 1985.** Mineralogía de los suelos volcánicos del Centro-sur de Chile: Minerales Primarios. En: Suelos Volcánicos de Chile, (ed J. Tosso), Capítulo 2, pp. 153-205. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Besoain, E. y Sadzawka, M.A. 1999.** 2.1 Fenómenos de retención de fósforo en los suelos volcánicos y sus consecuencias. En: Las Rocas Fosfóricas y sus Posibilidades de Uso Agrícola en Chile. (Eds. Besoain, Rojas y Montenegro). Colección Libros INIA N° 2. Santiago, Chile. p. 23-36.

- Besoain, E.; Montenegro, A. y Rojas, C. 1999a.** 8 Discusión y conclusiones. En: Las Rocas Fosfóricas y sus Posibilidades de Uso Agrícola en Chile. (Eds. Besoain, Rojas y Montenegro). Colección Libros INIA N° 2. Santiago, Chile. pp. 311-328.
- Besoain, E.; Sepúlveda, G. y Molina, R. 1999b.** 4.1 Caracterización mineralógica y química de rocas fosfóricas chilenas. En: Las Rocas Fosfóricas y sus Posibilidades de Uso Agrícola en Chile. (Eds. Besoain, Rojas y Montenegro). Colección Libros INIA N° 2. Santiago, Chile. p. 107-120.
- Borie, F. and Zunino, H. 1983.** Organic matter-phosphorus association as a sink in P fixation processes in allophanic soil of Chile. *Soil Biol. Biochem.* 15: 599-603.
- Borie, F.; Zunino, H. and Martinez, L. 1989.** Macromolecule-P associations and inositol phosphates in some Chilean volcanic soils of temperate regions. *Commun. Soil Sci. Plan.* 20 (17&18) 1881-1894.
- Chien, S. 2003.** Factors Affecting the Agronomic Effectiveness of Phosphate Rock for Direct Application. In: *Direct Application of Phosphate Rock and Related Technology: Latest Development and Practical Experiences*, pp. 50-62, (S.S.S. Rajan and S.H. Chien, ed.). Special Publications IFDC-SP-37, IFDC, Muscle Shoals, Alabama.
- Chien, S.; Prochnow, L. and Cantarella, H. 2009.** Recent developments of fertilizer production and use to increase nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy.* 102:261-316.
- Cornforth, I. 1990.** Practical soil management. Lincoln University Press, Whitireia Publishing and Daphne Brasell Associates Ltda., Wellington, New Zealand. 248p.
- Dahlgren, R.A., Saigusa, M. & Ugolini, F.C. 2004.** The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy.* 82: 113-182.
- FAO, 2007.** Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Boletín FAO N° 13. Fertilizantes y nutrición vegetal. 155 p.
- Frossard, E.; Condon, L.; Oberson, A.; Sinaj, S. and Fardeau, J. 2000.** Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality.* 29:12-53.
- Gray, C.; McLaren, R.; Roberts, A. and Condon, L. 1999.** The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 54(3):267-277.

- Havlin, J.; Beaton, J.; Tisdale, S. and Nelson, W. 1999.** Soil fertility and fertilizer: An introduction to nutrient management. Prentice-Hall Inc. Upper saddle River, New Jersey, USA. 499p.
- Hedley, M. and Bolan, N. 1997.** Developments in some aspects of reactive phosphate rock research and use in New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 37: 861-884.
- Hinsinger, P. 2001.** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*. 237: 173-195.
- IFDC, 2007.** Fertilizer Analysis Protocol of the International Fertilizer Development Center. Disponible en: <http://www.IDF.org>.
- Iretskaya, S.; Chien, S. and Menon, R. 1998.** Effect of acidulation of high cadmium containing phosphate rocks on cadmium uptake by upland rice. *Plant Soil*. 201:183-188.
- Jara, A., A. Violante, M. Pigna & M.L. Mora. 2006.** Mutual interactions of sulfate, oxalate, citrate, and phosphate on synthetic and natural allophanes. *Soil Science Society of America Journal*. 70(2): 337-346.
- Lindsay, W. 1979.** Chemical equilibria in soils. John Wiley and Sons. New York, USA. 449 p.
- Marscher, H. 1995.** Mineral nutrition of higher plants. Elsevier, London, UK. 889 p.
- Mella, A. & Kühne, A. 1985.** Sistemática y descripción de las Familias, Asociaciones y Series de Suelos Derivados de Materiales Piroclásticos de la Zona Central-Sur de Chile. En: *Suelos Volcánicos de Chile*, (ed J. Tosso), Capítulo 8, pp. 549-716. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Molina, M.; Aburto, F.; Calderón, R.; Cazanga, M. and Escudey, M. 2009.** Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: Phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil and Sediment Contamination*. 18:497-511.
- Mora, M. L. & Barrow, N.J. 1996.** The effects of time of incubation on the relation between charge and pH of soil. *European Journal of soil Science*, 47, 131-136.
- ODEPA. 2010.** Estudio de Diagnóstico de Mercado y Estudio de la Cadena de Comercialización de Fertilizantes en Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. 233p.

- Parfitt, R.L. 1978.** Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in Agronomy*. 30: 1-50.
- Perrott, K. & Metherell, A. 1997.** Incorporation of reactive phosphate rock into a phosphorus fertiliser decision support model for grazed pastures. In: *Proceedings of the Dahlia Greidinger International Symposium on Fertilization and the Environment*, Haifa. 322p.
- Rodríguez, J. 1993.** *Manual de Fertilización. Colección en Agricultura*. P. Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago, Chile. 362p.
- Sadzawka, A. y Carrasco, M.A. 1985.** Fósforo. En: *Suelos Volcánicos de Chile*, (ed J. Tosso), Capítulo 4, pp. 373-405. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Sadzawka, A.; Carrasco, M.A.; Grez, R.; Mora, M.L.; Flores, H. y Reaman, A. 2006.** *Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos*. 164 p. Revisión 2006. Serie Actas N° 34. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Santiago, Chile.
- Sadzawka, A.; Carrasco, M.A.; Demanet, R.; Flores, H.; Grez, R.; Mora, M.L. y Neaman, A. 2007.** *Métodos de análisis de tejidos vegetales*. 139 p. Segunda Edición. Serie Actas N° 40. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Santiago, Chile.
- Saggar, S.; Hedley, M. & White, R. 1990.** A simplified resin membrane technique for extracting phosphorus from soils. *Fertilizer Research*. 24:173-180.
- Saggar, S.; Hedley, M.; White, R.; Gregg, P.; Perrott, K. & Cornforth, I. 1992.** Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus: 1. The influence of phosphorus solubility and soil properties on the extractability of soil P. *Fertilizer Research*. 33:81-91.
- Saggar, S.; Hedley, M.; White, R.; Perrott, K.; Gregg, P.; Cornforth, I. & Sinclair, A. 1999.** Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus: 3 Field comparison of Olsen, Colwell and Resin soil P test for New Zealand pasture soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys*. 55:35-50.
- Sandaña, P. and Pinochet, D. 2011.** Ecophysiological determinants of biomass and grain yield of wheat under P deficiency. *Field Crops Research*. 120:311-319 (F.I.: 2.23). doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.005

- Sandaña, P.; Ramírez, M. and Pinochet, D., 2012.** Radiation interception and radiation use efficiency of wheat and pea under different P availabilities. *Field Crops Research*. 127: 44-50. (F.I.: 2.23) doi:10.1016/j.fcr.2011.11.005
- Sandaña, P. and Kalazich, J. 2015.** Ecophysiological determinants of tuber yield as affected by potato genotype and phosphorus availability. *Field Crops Research* 180: 21-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.005>
- Schoenau, J. & Huang, W. 1991.** Anion-exchange membrane, water and sodium bicarbonate extractions as soil tests for phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plan Analysis*. 22:465-492.
- Sharpley, A. and Moyer, B. 2000.** Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *J. Environ. Qual.* 29: 1462-1469.
- Siebold, E.; Navarro, H.; Undurraga, P.; Goic, L.; Matzner, M. y Meneses, G. 1999.** Fuentes de fósforo y uso de cal en praderas de Llanquihue. *Boletín Técnico N° 251*. INIA. Estación Experimental Remehue. Osorno, Chile. 8p.
- Sierra, C. 1993.** Efecto de la aplicación de dos rocas fosfóricas y superfosfato triple en una pradera naturalizada de la Décima Región. *Boletín Técnico N° 196*. INIA. Estación Experimental Remehue. Osorno, Chile. 21p.
- Sims, J.; Simard, R. and Joern, B. 1998.** Phosphorus losses in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.* 27:277-293.
- Standard Methods. 2005.** For the Examination of Water and Wastewater. A.D. Eaton, L.S. Clesceri, E.W. Rice, A.E. Greenberg and M.H. Franson (Eds.) 21st Edition. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). 1368p.
- Taiz, L and Zeiger, E. 2010.** *Plant physiology*. Sinauer Associates Inc., Publishers. Massachusetts, USA. 782 p.
- Taylor, M.; Gibb, R.; Willoughby, J.; Hewitt, A. and Arnold, G. 2007.** Soil maps of cadmium in New Zealand. Report of Landcare Research and Ministry of Agriculture & Forestry. 55p.
- Teuber, N. 2009.** Manejo de la pradera permanente posterior al establecimiento. *Informativo Técnico N° 73*. INIA. Estación Experimental Remehue. Osorno, Chile. 2p.

- Teuber, N. y Romero, O. 2004.** Manejo de praderas. En: manual de producción de bovinos de carne para la VIII, IX y X Regiones. (Ed. Rojas, C.) INIA- FIA. Temuco, Chile. pp. 33-50.
- Undurraga, P. 2000.** Dosis de corrección de fósforo y de enmiendas calcáreas. En: Curso de capacitación para operadores del programa de recuperación de suelos degradados INDAP, Décima Región. Serie Actas N° 2. (Ed. Bernier, R.). Osorno, Chile. pp. 56-75.
- Vistoso, E.; Bolan, N.S.; Theng, B.K.G. and Mora, M.L. 2009.** Kinetics of molybdate and phosphate sorption by some Chilean Andisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 9 (1):55-68.
- Vistoso, E.; Theng, B.K.G.; Bolan, N.S.; Parfitt, R. and Mora, M.L. 2012.** Competitive sorption of molybdate and phosphate in Andisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 12(1):59-72.
- Wada, K. 1985.** The distinctive properties of Andosols. *Advances in Agronomy*. 2: 173-229.
- White, G.N. & Zelazny, L.W. 1986.** Charge properties of soil colloids. In: *Soil Physical Chemistry* (ed D.L. Sparks), pp. 39-81. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Whitehead, D.C. 2000.** Nutrient elements in grassland. *Soil-Plant-Animal Relationships*. CABI Publishing. University Press, Cambridge, UK. 369p.
- Wright, C. 1965.** The volcanic ash soils of Chile. Report to the Government of Chile. FAO. Roma. Rep. N° 2017. 201p.



Más informaciones en: www.inia.cl

 inia@inia.cl

 [@inia.cl](https://twitter.com/inia.cl)

 [https://www.face](https://www.facebook.com/inia.cl)