

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

RESPUESTA DE PASTURAS MEZCLA DE SEGUNDO AÑO Y DE SUS
ESPECIES COMPONENTES A LA REFERTILIZACIÓN FOSFATADA
SEGÚN EL NIVEL DE PBRAY1 EN LA CAPA DE 0 – 7,5 cm DEL
SUELO

por

Nicola Gianni DI MURO MARRERO

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2019

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Carlos H. Perdomo, PhD.

Ing. Agr. Andrés Quincke, PhD.

Ing. Agr. Amabelia del Pino, PhD.

Fecha: 18 de diciembre de 2019

Autor:

Bach. Nicola Gianni Di Muro Marrero

AGRADECIMIENTOS

Al director de tesis PhD. Ing. Agr. Carlos H. Perdomo por su orientación, apoyo y por la colaboración en todas las etapas de la realización de la tesis.

A mi familia, amigos y a Irina por el apoyo brindado durante toda la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 FÓSFORO: GENERALIDADES	3
2.2 FORMAS DEL FÓSFORO EN EL SUELO.....	3
2.2.1 <u>Fósforo en solución</u>	3
2.2.2 <u>Fósforo inorgánico</u>	4
2.2.2.1 <u>Fósforo lábil</u>	4
2.2.3 <u>Fósforo orgánico</u>	4
2.2.4 <u>Ciclo del fósforo</u>	5
2.3 RETENCIÓN DEL FÓSFORO	6
2.3.1 <u>Disponibilidad del fósforo</u>	7
2.3.1.1 <u>Mineralización de fósforo orgánico – inmovilización de fósforo inorgánico</u>	7
2.3.1.2 <u>Efecto del pH sobre la disponibilidad de fósforo</u>	9
2.3.1.3 <u>Cambios en las condiciones de oxidación-reducción de los suelos</u>	9
2.4 FERTILIZANTES FOSFATADOS	10
2.4.1 <u>Fertilizantes: generalidades</u>	10
2.4.2 <u>Procesos de fabricación de fertilizantes fosfatados</u>	11
2.5 RECOMENDACIÓN DE DOSIS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS.....	12
2.5.1 <u>Análisis de suelo</u>	13
2.5.2 <u>Criterios de fertilización</u>	13
2.5.3 <u>Niveles críticos</u>	14
2.5.3.1 <u>¿Cómo se determina el nivel crítico?</u>	14

2.5.3.2 Implementación práctica de los niveles críticos	16
2.5.4 <u>Impacto ambiental</u>	17
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	18
3.1 GENERALIDADES	18
3.1.1 <u>Ubicación y descripción de los ensayos</u>	18
3.2 TRABAJO DE CAMPO	18
3.2.1 <u>Antecedentes edafológicos de los suelos</u>	18
3.2.2 <u>Caracterización de los sitios</u>	19
3.2.3 <u>Muestreo de plantas</u>	19
3.2.4 <u>Muestreo de suelo</u>	19
3.3 TRABAJO DE LABORATORIO.....	19
3.3.1 <u>Análisis de plantas</u>	19
3.3.2 <u>Análisis de suelo</u>	19
3.4 ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RESPUESTA.....	20
3.4.1 <u>Construcción de variables – incremento de rendimiento y rendimiento relativo</u>	20
3.4.2 <u>Análisis estadístico</u>	20
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1 RESPUESTA A LA REFERTILIZACIÓN FOSFATADA	22
4.1.1 <u>Respuesta a la refertilización fosfatada en materia seca por especie</u>	22
4.1.2 <u>Cambio de las proporciones de las especies de la mezcla en relación a trébol blanco</u>	29
4.1.3 <u>Respuesta de la relación gramínea/leguminosa a la dosis de P</u>	32
4.1.4 <u>Respuesta a la fertilización fosfatada en materia seca total</u>	33
4.2 NIVELES CRÍTICOS DE P EN PASTURAS MEZCLA.....	36
4.2.1 <u>Niveles críticos de P para especies individuales dentro de pasturas mezcla</u>	37
4.2.2 <u>Niveles críticos para pasturas mezcla</u>	39

4.3 COMPARACIÓN DE NIVELES CRÍTICOS DE ORIGEN NACIONAL E INTERNACIONAL CON LOS OBTENIDOS EN EL PRESENTE ESTUDIO	41
5. <u>CONCLUSIONES</u>	46
6. <u>RESUMEN</u>	48
7. <u>SUMMARY</u>	50
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	52

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Niveles críticos de P para algunas especies al momento de siembra de la pastura (ppm PBray1 en muestras de 0-15 cm de profundidad)	14
2. Partes por millón (ppm) de P Bray a instalación de ensayos por sitio	22
3. ANAVA y contrastes por especie para los cuatro sitios	25
4. ANAVA y contrastes para las especies con efectos significativos en rendimiento por corte y por especie	28
5. ANAVA y contraste en las relaciones significativas de las especies de la mezcla con trébol blanco, para los sitios Tossi y San José	29
6. Relaciones gramínea/leguminosa por sitio para los cortes 1 y 2	32
7. ANAVAs y contrastes del efecto de agregado de P en la producción de MS de las pasturas	34
8. ANAVA y contrastes por sitio para rendimiento, acumulados de los cortes 1 y 2	35
9. Comparación entre niveles críticos encontrados para especies puras a la siembra por diversos autores y los estimados en este trabajo para las mismas especies creciendo en pasturas mezcla al momento de la refertilización de segundo año	42
Figura No.	
1. Ciclo del P en el sistema suelo planta	6
2. Diagrama de procesos y formas de P	8
3. Evolución del consumo mundial de fertilizantes en el período 1950-2013	11

4. Ejemplo de uso del método de Cate y Nelson para estimar niveles críticos	15
5. Ejemplo de estimación de nivel crítico con el método lineal y de meseta considerando la respuesta (a) o el rendimiento relativo (b)	16
6. Respuesta de la producción acumulada de MS (Kg/ha promedio por especie) al agregado de P en pasturas de segundo año	24
7. Relación gramínea/trébol blanco según nivel de PBray1 a instalación del ensayo	31
8. Relación gramínea/trébol blanco según dosis de P para sitios con diferentes niveles de PBray1 a instalación del ensayo	31
9. MS acumulada en kg/ha según dosis para los dos primeros cortes de cada sitio	36
10. Rendimiento relativo para trébol blanco en función de PBray1 a instalación.....	37
11. Relación entre incremento de rendimiento en gramíneas y PBray1 a instalación.....	38
12. Relación entre incremento de rendimiento y PBray1 a instalación para trébol rojo.....	39
13. Relación incremento de rendimiento y PBray1 0-7,5 cm a instalación para pasturas mezcla	40
14. Relación rendimiento relativo y PBray1 0-7,5 cm a instalación para pasturas mezcla	41

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos del Uruguay son característicos por el bajo contenido de fósforo asimilable, siendo éste el principal nutriente limitante para la producción de pasturas, principalmente de leguminosas (Hernández, 2010). Es necesario hacer un uso racional de este nutriente ya que, en los costos de instalación de una pastura, la fertilización puede representar cerca del 50 - 65% de los costos totales (Bordoli, 1998).

El fósforo (P) es un elemento esencial para los seres vivos, cumple un rol fundamental en la transferencia de energía entre los procesos bioquímicos. El déficit de P en las leguminosas conduce a bajas tasas de crecimiento, baja concentración de P en el forraje y afecta negativamente la fijación biológica de nitrógeno (N).

Uno de los objetivos de sembrar pasturas con varias especies, gramíneas y leguminosas, es la calidad total con la que resulta el forraje. Asimismo, las leguminosas tienen un alto requerimiento de fósforo, lo que trae como consecuencia un aumento del uso de los fertilizantes fosfatados en suelos donde naturalmente el contenido de fósforo es bajo. Es común encontrar pasturas con bajos rendimientos a nivel productivo. Un estudio determinó que estos bajos rendimientos no se debieron al aumento de la compactación del suelo ni a la escasez de plántulas. Se debió casi en su totalidad a una nutrición imperfecta que involucraba tanto nitrógeno como fósforo (Willoughby, 1954). La optimización de la nutrición con P podría ayudar a maximizar los aportes de N a las pasturas mediante la fijación simbiótica de N y disminuir los aportes de N inorgánico mediante la fertilización (Mendoza et al., 2016).

Actualmente la información que existe respecto a los niveles críticos para las especies determina el nivel de un nutriente por encima del cual la probabilidad de obtener respuesta en rendimiento es escasa. Están calculados para determinada especie y nutriente creciendo en forma pura, lo cual es lógico si se habla de cultivos o pasturas mono-específicas. Sin embargo, cuando es necesario sembrar una pastura mezcla de varias especies es común en la práctica tomar como criterio de fertilización aquella especie con mayor nivel crítico para el nutriente en cuestión. Bordoli (1998) menciona que para mezclas el nivel de fertilización fosfatada es una medida que afecta la composición de la mezcla, pero no existe información que cuantifique dicha sugerencia.

En este sentido, el presente trabajo busca identificar los niveles críticos para fósforo en pasturas mezcla de forma de hacer más eficiente la fertilización

fosfatada, optimizando el rendimiento en materia seca, la calidad de la pastura y la relación entre ellos. Cuando se hace referencia a la eficiencia en la fertilización se tienen en cuenta tanto los aspectos económicos, como los productivos y los ambientales.

El presente trabajo tiene como objetivos:

1) Analizar la respuesta en forraje producido (MS total y de las especies componentes) al agregado de fósforo en las pasturas.

2) Sugerir un valor de nivel crítico de P disponible en suelo para pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas y para las especies que componen estas pasturas de la zona de la cuenca del río Santa Lucía.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 FÓSFORO: GENERALIDADES

El fósforo (P) es uno de los principales macronutrientes limitantes para la producción vegetal, y ha sido ampliamente demostrado que bajos niveles de P en suelo restringen la producción de forraje (Sinclair et al., 1994), su calidad y la persistencia de las especies implantadas (De Battista y Costa, 1998). Por lo tanto, la deficiencia de este nutriente impacta directamente en la producción de carne y leche (Mears y Cullis, 1993).

Los suelos del Uruguay son característicos por la baja disponibilidad de P, en promedio 0,032% (Hernández et al., 1995). El P disponible es solo una fracción del contenido total de éste en los suelos, y su disponibilidad está sujeta a la capacidad de retención de cada suelo. El P se combina con la fracción arcilla en mayor medida que con otras fracciones de suelo y, como consecuencia, suelos con mayor contenido de arcilla presentarán mayores contenidos de P (Hernández, 2010).

2.2 FORMAS DEL FÓSFORO EN EL SUELO

El P puede encontrarse en el suelo en un 50% como formas inorgánicas y 50% en forma de compuestos orgánicos. Dentro de la fracción inorgánica se encuentran en numerosas combinaciones con hierro, aluminio, calcio, flúor y otros elementos. Además, esta fracción aparece en suelo formando compuestos muy estables dada su baja solubilidad, por lo que el nutriente tiene pocas formas de perderse. El P orgánico se encuentra en el humus y otros materiales orgánicos, por lo tanto, esta forma del nutriente es mayor en los estratos más superficiales del suelo (Tisdale y Nelson, 1970).

2.2.1 Fósforo en solución

Los niveles de fósforo en solución son muy bajos, por ejemplo, en campo natural se estiman valores inferiores a 0,05 ppm y en campos con fertilizaciones medias valores entre 0,1 y 0,2 ppm (Hernández et al., 1995). Hernández (2010) ejemplifica que *“si se considera un nivel de 0,1 ppm P en la solución de un suelo, y un contenido de agua del orden del 20 %, esto significa que en los primeros 20 cm de suelo habrá 50 g de fósforo. Un cultivo absorbe durante su ciclo cantidades del orden de 10 a 20 kg de P/ha, por lo cual los 50 g de P no serían suficientes para cubrir las necesidades de un solo día. Es necesaria, por lo tanto, una reposición permanente de P a la solución, la cual se lleva a cabo fundamentalmente a partir de la fracción lábil del P inorgánico”*.

La fracción molar de las diferentes formas de ion fosfato en la solución del suelo está relacionada con el pH del medio, el ion H_2PO_4^- se favorece a pH menor que 7 y el ion HPO_4^{2-} se favorece a pH mayor a 7.

2.2.2 Fósforo inorgánico

El principal aporte de P inorgánico son los residuos de plantas y animales, los que al degradarse por medio de microorganismos forman compuestos inorgánicos (Hernández, 2010).

En suelos con historia de fertilización fosfatada, el P inorgánico toma mayor importancia relativa en comparación con el P total. Esto es porque, a medida que transcurre el tiempo, el P del fertilizante va formando compuestos insolubles y su disponibilidad se va reduciendo (Hernández, 2010).

Las formas inorgánicas se encuentran formando parte de compuestos como fosfatos de hierro, aluminio y calcio. Según la acidez de los suelos serán los compuestos que se encontrarán en ellos: en suelos neutros y calcáreos predominan los fosfatos de calcio, mientras que en suelos ácidos predominan los fosfatos de hierro y aluminio (Hernández, 2010). Generalmente la mayor disponibilidad de P en el suelo para los cultivos se da en un rango de pH de entre 5,5 y 7 (Hernández, 2010).

2.2.2.1 Fósforo lábil

Como se mencionó, los compuestos inorgánicos de P en suelo están caracterizados por su baja solubilidad. Los fertilizantes solubles aplicados al suelo van perdiendo solubilidad a medida que transcurre el tiempo. Los compuestos resultantes de la reacción entre el suelo y el fertilizante soluble, van pasando por diferentes etapas de solubilidad. Cuando el P reacciona con el suelo, las primeras reacciones forman compuestos metaestables, los cuales pueden aportar P rápidamente a la solución ante un descenso, tendiendo a reponer dicha cantidad hasta un nivel dependiente del tipo de compuesto y su K_{ps} . Esta fracción es la que se conoce como P inorgánico lábil del suelo (Hernández, 2010).

Así como se menciona el concepto de fósforo lábil se debe definir el concepto de fósforo no lábil, el cual refiere a aquellas sustancias muy estables y de muy baja K_{ps} . Estas dos características hacen que dichos compuestos sean de muy baja reactividad química (Hernández, 2010).

2.2.3 Fósforo orgánico

En las formas orgánicas del P uno o más de los iones hidrógeno del ácido fosfórico son eliminados en una unión éster. Los iones de hidrógeno restantes

son reemplazados por cationes metálicos (Hernández, 2010). La presencia de estas formas de P orgánico es principalmente como fosfolípidos, ácidos nucleicos y fosfato inositol (Tisdale y Nelson, 1970), los cuales a su vez pueden encontrarse en tres principales fracciones: humus del suelo, restos frescos de cultivos no humificados y biomasa microbiana (Hernández et al., 1995).

El P orgánico aumenta y disminuye con el contenido de materia orgánica del suelo, por lo que su contenido es comparativamente más abundante en el horizonte superficial.

Los contenidos de P orgánico aumentan con incrementos en contenidos de carbono y nitrógeno orgánico. En este sentido las relaciones C/N son más estables que las relaciones C/P y N/P. La proporción C/N/P general en los suelos es de 100:10:1 (Tisdale y Nelson, 1970), mientras que para suelos del Uruguay se han encontrados relaciones C/N/P promedio de 106:10:0,63 (Hernández et al., 1995) .

2.2.4 Ciclo del fósforo

Una vez que el fósforo proveniente del fertilizante es disuelto en la solución del suelo puede seguir varios destinos. Puede ser directamente absorbido por las plantas, absorbido sobre las superficies de distintos compuestos coloidales, precipitado como diferentes compuestos inorgánicos o ser inmovilizado por la biomasa microbiana del suelo (Berardo y Marino 2000, Hernández 2010). En la Figura 1 se puede visualizar un esquema de los procesos mencionados

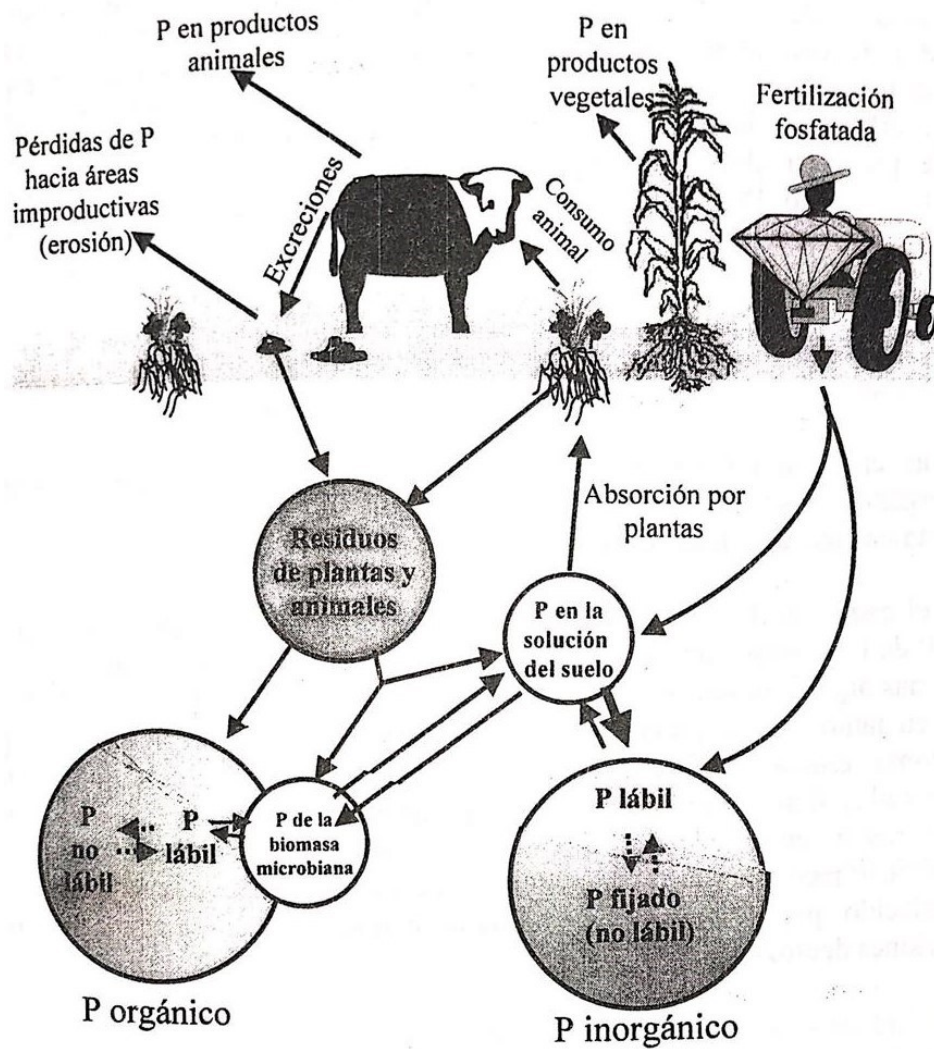


Figura 1. Ciclo del P en el sistema suelo planta

Fuente: Hernández (2010).

2.3 RETENCIÓN DEL FÓSFORO

La retención del fósforo es un proceso que implica la desaparición casi total del P en solución del suelo. Este fenómeno sucede, por ejemplo, cuando se agrega un fertilizante fosfatado soluble en agua al suelo. Generalmente el P desaparece rápidamente de la solución del suelo por que reacciona con cationes

como Al, Fe o Ca, o con superficies con alta reactividad química formando productos de baja solubilidad (Hernández, 2010).

Los principales mecanismos de retención de P son la precipitación y la adsorción. La precipitación se da en la solución del suelo, cuando están presentes en ella Ca^{+2} , Al^{+3} y Fe^{+3} . La reacción de H_2PO_4^- con dichos cationes resulta en compuestos que precipitan por su baja K_{ps} . La adsorción, a diferencia de la precipitación, no implica atracción electrostática si no que es un proceso de retención aniónica sobre la superficie de óxidos, hidróxidos y carbonatos. En este proceso el anión entra en coordinación con oxígenos ligados al metal, siendo estas reacciones menos reversibles y tendientes a la formación de compuestos más estables (Hernández, 2010).

Uno de los factores más importantes que influye en la retención del fósforo es el tipo de arcilla presente en el suelo. El fósforo es retenido en mayor medida en suelos con presencia de arcillas de tipo 1:1 que en aquellos con arcillas de tipo 2:1. En zonas de altas temperaturas y altas precipitaciones es frecuente encontrar arcillas de tipo caolinítico, las cuales presentan hidróxidos de hierro y aluminio, que contribuyen a la retención del fósforo (Tisdale y Nelson, 1970).

2.3.1 Disponibilidad del fósforo

Existen tres factores más importantes que condicionan la disponibilidad del P; uno es la mineralización de fósforo orgánico y la inmovilización de fósforo inorgánico, el efecto del pH sobre la disponibilidad de fósforo y, por último, los cambios en las condiciones de oxidación-reducción de los suelos.

2.3.1.1 Mineralización de fósforo orgánico – inmovilización de fósforo inorgánico

Ambos factores ocurren en procesos biológicos dinámicos que determinan cambios en las formas de P en los suelos.

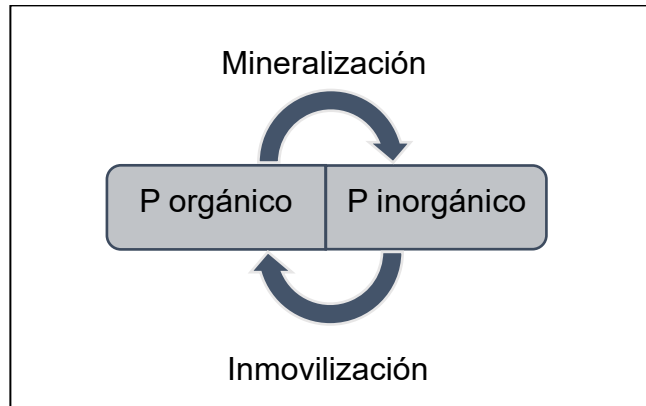


Figura 2. Diagrama de procesos y formas de P

Fuente: adaptado de Hernández (2010).

Una enzima muy importante en todo el proceso de la mineralización es la fosfatasa, la cual tiene la capacidad de desfosforilar todos los fosfatos orgánicos de origen vegetal. Estas enzimas están presentes en los microorganismos componentes de la microflora del suelo, las cuales también se presentan como enzimas libres en suelo. La actividad de la fosfatasa está condicionada por varios factores como: pH, humedad, temperatura y se ve aumentada su capacidad cuando aumenta el contenido de carbono de los suelos (Hernández, 2010).

El contenido de carbono afecta directamente la mineralización de los restos vegetales, y las relaciones C:P regulan si el P proveniente de estos restos serán mineralizados o inmovilizados (Hernández, 2010).

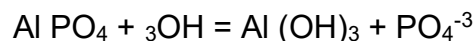
Estudios realizados han demostrado que si la relación C:P inorgánico es 200:1 o menor ocurre mineralización, si la relación es entre 200 y 300 no ocurre ni pérdida ni ganancia de P inorgánico y si la relación es 300:1 ocurre inmovilización (procesos descritos en la Figura 2). Se cree que la proporción N:P está estrechamente ligada a la mineralización e inmovilización y, en este sentido, se sugiere que la disminución del suministro de uno de ellos tiene como consecuencia la mineralización aumentada del otro. Por ejemplo, si el nitrógeno fuera limitante, el fosfato inorgánico podría acumularse en el suelo y la formación de materia orgánica en el mismo sería inhibida. La adición de nitrógeno como fertilizante bajo tales condiciones daría por resultado la inmovilización no solo por parte del fósforo inorgánico acumulado, sino que también parte del nitrógeno proveniente del fertilizante (Tisdale y Nelson, 1970).

Por lo tanto, si se añaden cantidades adecuadas de nitrógeno, fósforo y azufre a los suelos y a su vez se les devuelven los residuos de la cosecha, algunos elementos añadidos pueden ser inmovilizados en combinaciones orgánicas totalmente estables con compuestos carbonados. En el mismo sentido, la producción continuada de cosechas de los suelos sin la adición de nitrógeno, fósforo y azufre suplementario, dará como resultado la mineralización de estos elementos y su subsiguiente agotamiento en los suelos (Tisdale y Nelson, 1970).

2.3.1.2 Efecto del pH sobre la disponibilidad de fósforo

La disponibilidad del P está afectada en gran medida por el pH del suelo, ya que esta disponibilidad es resultado de diversos procesos biológicos y químicos. El pH afecta la disponibilidad del P en suelo por los mecanismos de retención de P, mineralización del P orgánico, la solubilización de compuestos fosfatados y formas químicas en solución (Hernández, 2010).

En suelos ácidos el pH tiene un efecto sobre el comportamiento de compuestos fosfatados de Fe y Al y sus hidroxilos asociados. En la siguiente ecuación se representa este efecto:



Al aumentar la actividad de los grupos OH⁻ por un aumento del pH, se libera fosfato de los compuestos de hierro y aluminio, mientras que estos últimos permanecen en formas insolubles de hidróxidos. Lo contrario ocurre cuando el pH disminuye, la retención aumenta sobre todo por la reacción de los fosfatos con hierro, aluminio y sus hidróxidos (Hernández, 2010). En suelos alcalinos, cuando baja el pH los fosfatos de calcio se disuelven (Hernández, 2010), mientras que si el pH sube más el P es retenido. Como combinación de estos dos efectos, en la mayoría de los suelos, la disponibilidad de P es máxima en el rango de pH 5,5 – 7, en cambio, la disponibilidad disminuye cuando el pH es menor a 5,5 o mayor a 7.

2.3.1.3 Cambios en las condiciones de oxidación-reducción de los suelos

Condiciones de anaerobiosis en un suelo determinan que ciertos microorganismos deban hacer uso de otros elementos diferente al O₂ como aceptores de electrones. El Fe puede ser usado como aceptor pasando de Fe⁺³ a la forma reducida Fe⁺², esta reducción del Fe trae como consecuencia una liberación de los fosfatos ligados al Fe hacia la solución. Por este hecho es que

se aumenta la disponibilidad de P luego de inundar los suelos (Hernández et al., 1995).

2.4 FERTILIZANTES FOSFATADOS

2.4.1 Fertilizantes: generalidades

Las plantas necesitan cubrir sus requerimientos nutricionales para poder desarrollarse, pero, aunque los nutrientes son extraídos naturalmente del suelo y del aire, las cantidades absorbidas pueden no ser suficientes para cubrir las necesidades de algunas especies. Esto se intensifica más aún, dado que actualmente los potenciales de producción y otros factores que llevan a la necesidad de producir más, han aumentado (Halliday y Trenkel, 1992). En casos de que el suministro natural no sea suficiente se puede suplir esta deficiencia con el agregado del o los nutrientes limitantes mediante el uso de fertilizantes. La adición de fertilizante en los suelos de los cultivos es una práctica muy antigua, se conocen registros que datan del siglo XIII sobre el uso de prácticas agrícolas que incluían fertilizantes, principalmente de origen orgánico.

Con la evolución de la industria y la química surgen nuevos productos que podían usarse como fertilizantes, cuyas concentraciones del nutriente en cuestión eran mucho más altas que en cualquier resto orgánico que pudiera usarse como fertilizante. Esta mayor concentración facilitó el traslado de grandes cantidades de nutrientes hacia los suelos, y por lo tanto el uso de estos fertilizantes aumentaron considerablemente en el mundo. Desde 1960 hasta hoy se ha multiplicado casi por 6 el uso de fertilizantes nitrogenados, y casi que duplicado el uso de fertilizantes fosfatados y potásicos (Figura 3, USDA, 2018).



Figura 3. Evolución del consumo mundial de fertilizantes en el período 1950-2013

Fuente: USDA (2018).

2.4.2 Procesos de fabricación de fertilizantes fosfatados

Los fertilizantes fosfatados son obtenidos a partir de una roca de origen sedimentario llamada fosforita. Se pueden encontrar dos tipos de fosforitas que son utilizadas para la fabricación de fertilizantes. En primer lugar, el uso de fosforitas “blandas” de uso directo, las cuales no son más que roca molida, tamizada y embolsada para su posterior uso en el campo. Ésta es una fuente de fósforo poco soluble (Casanova, 2008). Otras fuentes de fósforo más soluble surgen del procesamiento de otro tipo de fosforita denominada “fosforita dura” de origen ígneo o metamórfico que, tratada con ácidos H_2SO_4 y H_3PO_4 , se obtienen fertilizantes con distinto contenido de fósforo y otros nutrientes, como, por ejemplo,

- superfosfato común: resulta de tratar fosforitas de origen ígneo o metamórfico con ácido sulfúrico. Este fertilizante además de aportar fósforo también aporta azufre
- superfosfato triple: resulta de tratar fosforitas de origen ígneo o metamórfico con ácido tetraoxofosfórico. Este fertilizante se caracteriza por su gran concentración de fósforo en su composición.

Ambos fertilizantes mencionados presentan la mayor parte del P soluble en agua, lo cual lo hace rápidamente disponible para las plantas.

El contenido de fósforo de los fertilizantes se expresa en Uruguay como porcentaje de óxido de fósforo (%P₂O₅). La conversión de %P a %P₂O₅ y viceversa surge de las siguientes expresiones:

$$\%P = \%P_2O_5 * 0,43$$

$$\%P_2O_5 = \%P * 2,29$$

Como ejemplo del %P de un fertilizante se mostrará el caso del superfosfato triple Ca(H₂PO₄)₂ + H₂O, cuyo % P₂O₅ es 46, por lo tanto: la masa molar de este compuesto será la suma de la masa de cada átomo que compone la molécula: 252,07 gramos/mol, la masa molecular del P es 30,98. Como se tienen 2 átomos de P, se debe multiplicar:

$$30,98 * 2 = 61,95 \text{ gramos/mol}$$

$$\%P = 61,95 / 252,07 * 100 = 24,60\%$$

$$\%P_2O_5 = 24,60\% * 2,29 = 56,40\%$$

Como resultado se obtiene 56,40% y no 46%, y la diferencia está explicada por la proporción real de agua y la presencia de otros componentes estabilizadores de la reacción que hacen variar el porcentaje. Por esto, según YPF el porcentaje mínimo de P₂O₅ de este fertilizante debe ser 46%, y el 80% del total debe ser soluble en agua (YPF, s.f.).

2.5 RECOMENDACIÓN DE DOSIS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

La adición de un fertilizante al suelo de un cultivo se hace con los objetivos de levantar limitantes de uno o más nutrientes sin los cuales el cultivo no podría desarrollarse y aumentar la productividad y la rentabilidad del cultivo, minimizando el impacto ambiental en ambos casos. En este caso, por ejemplo, la adición de fertilizantes fosfatados a pasturas puras o mezcla incrementa el número de nódulos y la fijación de N de las leguminosas (Racca et al., 2001).

Diversos factores influyen en la cantidad de fertilizante a agregar, como son las características del cultivo y del suelo, la localización del fertilizante, el clima (humedad y temperatura), el rendimiento esperado y diversos factores económicos (Casanova y Barbazán, 2002).

2.5.1 Análisis de suelo

Los análisis químicos brindan información para intentar cuantificar la disponibilidad de un nutriente en el suelo.

Los métodos de análisis de suelo existentes para P se dividen entre los que hacen una extracción química (PBray1, Olsen, P Mehlich III, P cítrico, entre otros) y los que actúan reteniendo aniones y cationes de la solución y de superficie de partículas de suelo, llamados métodos de resinas de intercambio (Bracco y Hernández, 2018).

Hernández, citado por Bracco y Hernández (2018), menciona que *"los análisis del suelo para P generalmente están basados en la estimación del P presente en la fracción inorgánica lábil. Básicamente, lo que realizan las diferentes metodologías es una "estimación proporcional" del P presente en la fracción lábil y no la totalidad de la misma, ya que difícilmente pueda evaluarse el contenido de una fracción de las cuales no se conocen sus límites"*. A partir de la información resultante de los análisis de suelo es que se establecen las recomendaciones de fertilización.

Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos por los distintos análisis pueden estar sesgados en su valor absoluto dependiendo de las características del suelo tales como, contenido de arcilla, pH, carbonatos de calcio, compactación. La interpretación de estos resultados debe considerar este efecto.

2.5.2 Criterios de fertilización

Para cada decisión de fertilización existen diversos factores que influyen en la decisión tomada, como pueden ser las características de cultivo, suelo, clima, etc. Sin embargo, siempre que se realizan recomendaciones son fundamentadas en una determinada estrategia o filosofía de fertilización (Castillo et al., 2013). La más usada es la de "nivel de suficiencia" (Mallarino, 2005), la cual se centra en que existe un nivel de nutriente por debajo del cual hay respuesta al agregado de fertilizante. Otra estrategia es la de "subir y mantener", la cual se basa en el poder residual del P y dice que si el nivel de un nutriente en el suelo está por debajo del "óptimo", no solo se fertiliza para alcanzar el rendimiento máximo del cultivo, sino que también se fertiliza para alcanzar el nivel "óptimo". En este caso, se entiende por óptimo a la clasificación en clases según niveles de nutriente en suelo (Mallarino, 2005).

Otro enfoque es el llamado balance de nutrientes el cual considera la oferta del ambiente, las entradas por fertilizante y las salidas asociadas a las

pérdidas y exportación en grano determinado por la expectativa de rendimiento (Dobermann y Fairhurst, citados por Castillo et al., 2014).

2.5.3 Niveles críticos

Un nivel crítico (NC) se define como el contenido de un nutriente por debajo del cual la producción del cultivo o el rendimiento disminuye. Aplicado al tema que aborda este trabajo, se definirán niveles críticos de P como “*el valor de análisis de P disponible del suelo por encima del cual no es esperable una respuesta en rendimiento importante o rentable frente al agregado de fertilizante fosfatado*” (Bordoli, 1998). Dicho valor de análisis de P en suelo está determinado por un método de análisis de suelo, el PBray No. 1 (en adelante PBray1, Bray y Kurtz, 1945). Este método es muy utilizado en Uruguay.

El método de análisis PBray1 si bien se adapta a la mayoría de los suelos del país, presenta algunas limitantes para evaluar correctamente la disponibilidad de P en suelos desarrollados de materiales con influencia de basalto o suelos de muy bajo o muy alto pH (Hernández, 2010).

Para la mayoría de las especies de interés agronómico se han estudiado los niveles críticos de cada nutriente. Para el caso de fósforo se muestran algunos ejemplos en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Niveles críticos de P para algunas especies al momento de siembra de la pastura (ppm PBray1 en muestras de 0-15 cm de profundidad)

Cultivo	ppm PBray1
Alfalfa	20-25
Trébol blanco	15-16
Trébol rojo	12-14
Lotus	10-12
Gramíneas	8-10

Fuente: Bordoli (1998).

2.5.3.1 ¿Cómo se determina el nivel crítico?

Existen diferentes métodos para estimar niveles críticos, el más tradicional es el propuesto por Cate y Nelson donde se busca maximizar los puntos en dos cuadrantes, así como demostrar gráficamente correlaciones entre los datos. A nivel operativo, el método implica ubicar la superposición de una

línea vertical y otra horizontal sobre un diagrama de dispersión (rendimiento o rendimiento relativo en función de dosis agregada de fertilizante), de forma de maximizar el chi-cuadrado presente en los dos cuadrantes positivos opuestos (Figura 4). El punto donde la línea vertical corta el eje de las abscisas determina el nivel crítico, y los dos cuadrantes opuestos representan la zona de alta y baja respuesta a la fertilización (Cate y Nelson 1971, Nelson y Anderson 1977). Cuando los datos provienen de experimentos de campo con adecuada variabilidad de disponibilidad de nutriente, el nivel crítico se corresponde a un valor de no más del 80% del rendimiento relativo (Ron, 2003).

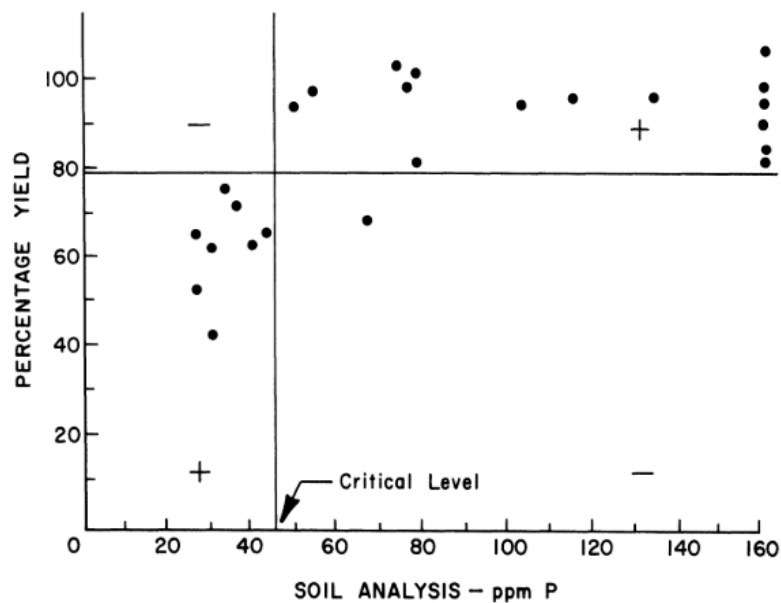


Figura 4. Ejemplo de uso del método de Cate y Nelson para estimar niveles críticos

Fuente: Nelson y Anderson (1977).

Otro método para obtener el nivel crítico es el ajuste de un modelo lineal-plateau o cuadrático-plateau: una función continua con un punto de quiebre. Por encima de este punto se puede asumir que no se encuentra respuesta y, por lo tanto, se lo cataloga como nivel crítico. Este método determina un nivel crítico un poco mayor que el método propuesto por Cate y Nelson, ya que este punto se sitúa en el 90-95% del rendimiento relativo (Figura 5, Ron, 2003).

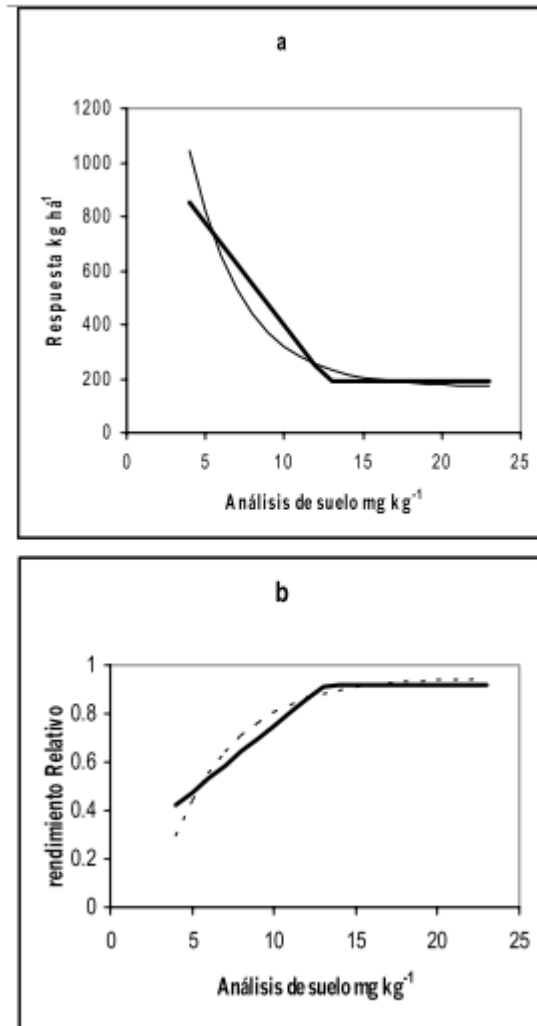


Figura 5. Ejemplo de estimación de nivel crítico con el método lineal y de meseta considerando la respuesta (a) o el rendimiento relativo (b)

Fuente: Ron (2003).

2.5.3.2 Implementación práctica de los niveles críticos

Como se mencionó, un nivel crítico refiere al nivel de un nutriente por encima del cual no se espera que exista una mejora en el rendimiento de una determinada especie. En el Cuadro 2 se mencionaron los niveles críticos para fósforo de las principales especies forrajeras utilizadas en Uruguay. Dichos niveles críticos fueron calculados para expresar el potencial de la especie en

forma de pasturas puras y no de mezclas de especies. Pero cuando se siembran pasturas mezcla se utiliza como criterio de fertilización las necesidades de la especie más exigente dentro de las componentes de la mezcla. Esto lleva a cuestionarse si este criterio maximizaría el rendimiento de la mezcla como tal o favorecería solo a algunas especies y otras se verían deprimidas.

2.5.4 Impacto ambiental

Como es señalado por Schulte y Herlihy (2007), años atrás las recomendaciones de fertilización fosfatada únicamente tenían en cuenta la deficiencia de P según el nivel crítico de cada especie. Sin embargo, las recomendaciones actuales deben tener en cuenta tanto este aspecto como el impacto ambiental. La respuesta del rendimiento a la fertilización fosfatada está inversamente relacionada con el nivel de P en suelo (Holford et al. 1985, Slaton et al. 2005), mientras que existe una relación proporcional entre el nivel de P en suelo y el riesgo de pérdida de P en el recurso hídrico (Kurz et al. 2005, Schulte et al. 2006). En este sentido, es importante cuantificar la fertilización fosfatada en relación con el índice de P (Gburek et al., 2000) para optimizar la producción de la pastura, minimizando la pérdida de P en agua y, por lo tanto, el posible impacto ambiental.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 Ubicación y descripción de los ensayos

Los ensayos se realizaron en cuatros sitios, los mismos fueron: NP: -34.630594°, -55.906118°, Tossi: -34.223500°, -56.259456°, San José: -34.078306°, -56.702029° y Candil: -34.049603°, -56.319161. Ubicados en los departamentos de Canelones (NP), Florida (Tossi y Candil) y San José (San José).

Las dimensiones del ensayo fueron de 16 x 9 metros en cada uno de los cuatro sitios, conteniendo 12 parcelas de 4 x 3 metros. El diseño utilizado fue Diseño en Bloques Completos al Azar, compuesto por cuatro tratamientos que fueron cuatro dosis diferentes de P₂O₅ (0, 40, 80 y 120 kg/ha), en tres repeticiones. El fertilizante utilizado fue superfosfato triple (0-46/46-0) y aplicado al voleo en superficie. El área del ensayo fue cercada con alambrado eléctrico impidiendo el acceso del ganado. Al momento de instalación se homogeneizo el área con un corte a todo el ensayo.

3.2 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo realizado durante el periodo de evaluación del ensayo consistió en varios muestreos, tanto de planta como de suelo, intentando que éstos coincidieran con las estaciones del año. Los ensayos fueron instalados en pasturas de segundo año en predios ganadero-lecheros el 27/05/2014, 04/04/2014, 27/03/2014, 02/04/2014, y en los sitios NP, Tossi, San José y Candil respectivamente. Los muestreos fueron realizados el 25/08/2014 y 18/11/2014 para el sitio NP, el 28/05/2014, 19/08/2014, 23/10/2014, 24/4/2015 y 11/11/2015 para el sitio Tossi, el 29/05/2014 y 13/11/2014 para el sitio San José, y el 28/05/2014, 12/08/2014, 23/10/2014 y 11/11/2015 para el sitio Candil.

3.2.1 Antecedentes edafológicos de los suelos

Los sitios con los que se trabajó en este estudio se encuentran en las unidades de suelo: Isla Mala, San Gabriel – Guaycurú, San Jacinto y Tala Rodríguez.

3.2.2 Caracterización de los sitios

La información sobre la clasificación edafológica y características físico-químicas de los suelos de los diferentes sitios está disponible en Bracco y Hernández (2018) quienes realizaron un estudio en estos mismos sitios.

3.2.3 Muestreo de plantas

Para los muestreos de planta, se utilizó una segadora marca Agría de barra de cuchillas con un ancho de corte de 1,05 metros, con la cual se realizó un corte a todo el largo del centro de cada parcela. Cada muestra se pesó y, a partir de ella, se tomó una sub-muestra de 500 g. aproximadamente. La frecuencia de estos muestreos estuvo relacionada a la cantidad de MS acumulada en la pastura, resultando en que los cortes fueron más frecuentes en primavera y menos frecuentes en verano.

3.2.4 Muestreo de suelo

Los muestreos de suelo se realizaron previo a la fertilización y después de cada corte de pastura. Utilizando un taladro calador de 2,54 cm (1") de diámetro, se muestreó el suelo de cada parcela a dos profundidades: 0-7,5 y 7,5-15 cm. Cada muestra fue conformada por 8 tomas en cada parcela.

3.3 TRABAJO DE LABORATORIO

3.3.1 Análisis de plantas

Luego del trabajo de campo, cada muestra fue separada en dos. A una de las submuestras se le realizó separación botánica para distinguir entre las distintas especies que conformaban la pastura, malezas y restos secos; la otra submuestra se conservó en su estado original. Posteriormente, ambas submuestras fueron secadas en estufa a 60° C para calcular el rendimiento en MS.

3.3.2 Análisis de suelo

Las muestras extraídas fueron secadas en estufa a 40° C por 48 horas y luego molidas en un molino de suelos. El método aplicado para la determinación del fósforo disponible fue Bray1. En este método se utilizó una relación suelo-solución de 1:7 y un tiempo de agitado de 2 minutos (UdelaR. FA, 2010).

3.4 ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RESPUESTA

3.4.1 Construcción de variables – incremento de rendimiento y rendimiento relativo

Para poder realizar la determinación de los niveles críticos, se construyeron dos índices de respuestas: incremento de rendimiento (Inc. Rend.) y rendimiento relativo (RR%), de acuerdo a las fórmulas siguientes:

$$RR(\%) = \frac{R0}{Rmax} \times 100 \text{ y}$$

$$Inc. Rend \left(\frac{kg}{ha} \right) = (Rmax - R0)$$

donde $R0$ es el rendimiento del testigo y $Rmax$ es el rendimiento máximo.

Para hallar los valores de rendimiento máximo, se modeló la respuesta de la fertilización fosfatada como la relación entre rendimiento y dosis para cada corte de cada sitio. En caso de que el R^2 fuera mayor que 0,20, se tomó el modelo como válido, en caso contrario, el rendimiento máximo se calculó como el promedio de los tratamientos fertilizados.

En cuanto a los análisis para estimar los niveles críticos, primero se relacionó rendimiento relativo (RR%) y/o incremento en rendimiento (Inc. Rend.), en función de la dosis de P agregado. Luego se ajustaron a esa relación diversos modelos de regresión; lineal, cuadrático y dos modelos discontinuos (lineal-plateau y cuadrático-plateau). Luego se seleccionó el modelo con mayor R^2 siempre que este valor fuera mayor a 0,20. Se tomó como nivel crítico el valor de la regresión donde la derivada fuera nula (a partir del cual no hay respuesta al agregado de P). En el caso de que se hubiera seleccionado el modelo lineal se tomó como valor crítico el valor máximo de PBray1.

Para dichas construcciones de variables y los posteriores análisis que las involucran, se utilizó el software Microsoft Excel.

3.4.2 Análisis estadístico

El modelo usado para el análisis de varianza fue el siguiente:

$$Y_{(ij)} = \mu + D_{(i)} + \beta_{(j)} + \varepsilon_{(ij)}$$

Donde:

$Y(ij)$ = rendimiento en materia seca por hectárea (kg MS/ha)

μ = media poblacional

D = efecto de la i-ésima dosis de fósforo

B = efecto del j-ésimo efecto bloque

ε = error experimental

Los supuestos son:

- Heterogeneidad de los suelos, agrupable en bloques.
- Por bloque, se asignan aleatoriamente todos los tratamientos.
- Igual número de repeticiones por tratamiento.

Los datos obtenidos del análisis de materia seca fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de dilucidar diferencias significativas en el efecto de los tratamientos sobre la respuesta en rendimiento (kg MS/ha). Para analizar la separación de medias grupales se utilizaron los contrastes cero versus resto (C1), lineal (C2) y cuadrático (C3). Cabe señalar que C1 no es ortogonal con los otros dos. La respuesta se consideró significativa cuando el p-valor del análisis de varianza o alguno de los contrastes fue menor o igual a 0,05.

Para realizar los distintos análisis se utilizaron los programas estadísticos INFOSTAT y su interfaz de R.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los niveles promedios de P lábil medidos como PBray1 a 0-7,5 cm de profundidad a la instalación (refertilización de segundo año) del ensayo variaron entre sitios. En el Cuadro 3 se presentan los valores para los cuatro sitios evaluados.

Cuadro 2. Partes por millón (ppm) de PBray1 a instalación de ensayos por sitio

Sitio	ppm PBray1 a instalación
NP	4
Tossi	8
San José	12
Candil	15

4.1 RESPUESTA A LA REFERTILIZACIÓN FOSFATADA

4.1.1 Respuesta a la refertilización fosfatada en materia seca por especie

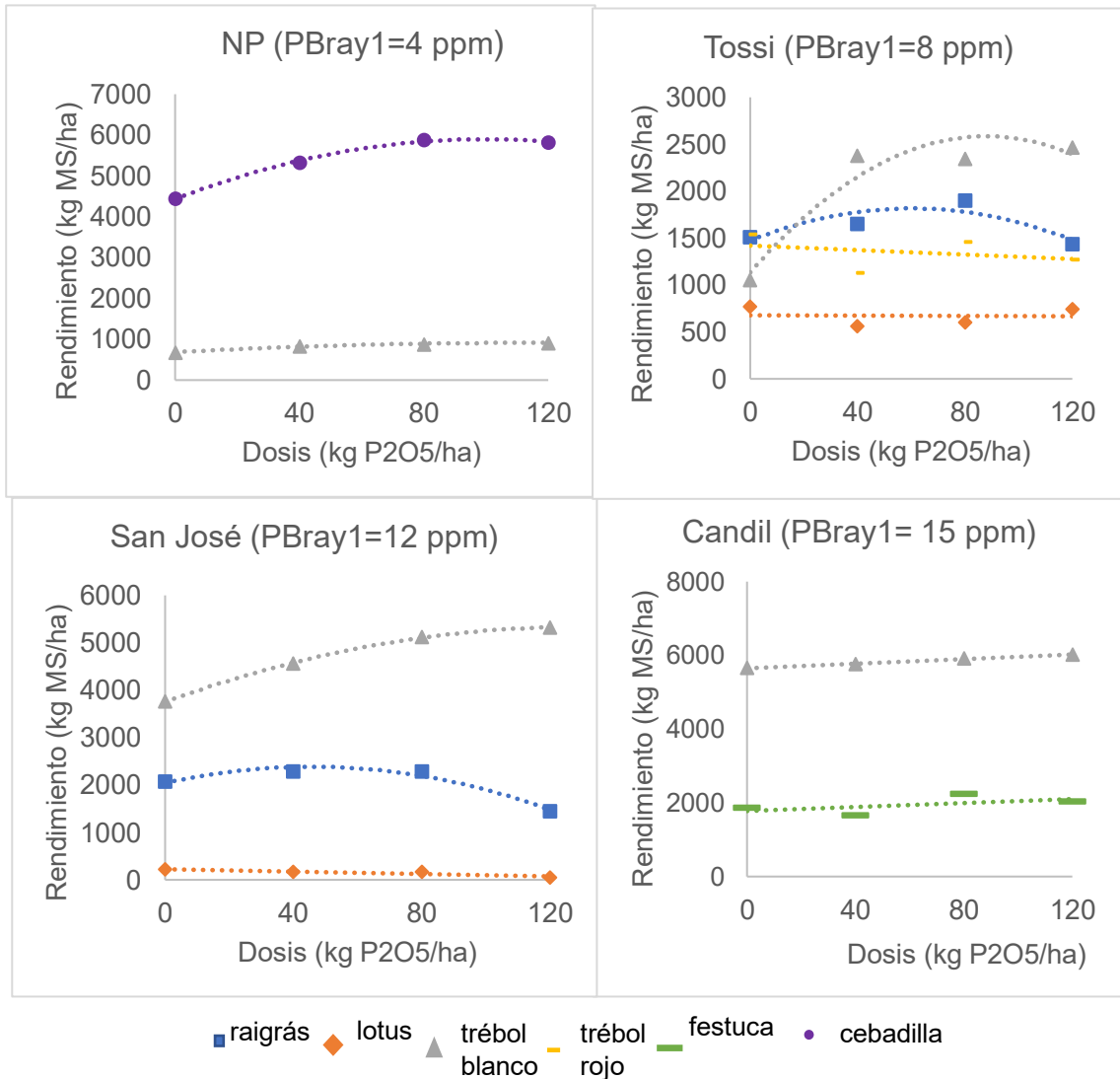
Existe escasa información local respecto a la respuesta individual de las especies forrajeras componentes de una pastura mezcla al agregado de P, ya que la mayoría de los trabajos estudian solamente la respuesta de la mezcla. Por otra parte, la respuesta de las especies individuales al agregado de P se ha estudiado mayormente en especies puras, y luego se asume que esa respuesta va a ser similar cuando esa especie crece en mezcla, y que no sería afectada por la competencia de las demás especies.

Algunos autores mencionan la importancia de un manejo diferencial de la fertilización de las mezclas para lograr un buen balance de una mezcla forrajera (Bordoli 1998, Carámbula 2010a), pero no se han encontrado referencias concretas acerca de la cuantificación de este efecto.

En general, en estos ensayos las mayores respuestas a la refertilización con P ocurrieron en los sitios con menores valores de P lábil (Figura 6). La especie que mostró más respuesta fue el trébol blanco, aunque, paradójicamente, en el sitio con menor nivel de PBray1 (NP) no se observó esta tendencia. Una de las posibles explicaciones a este resultado es que la pastura de este sitio ya presentaba un stand muy bajo de plantas de trébol blanco al

momento de la refertilización de 2o. año, posiblemente debido a un periodo de déficit hídrico previo a la aplicación de P y un bajo nivel de P lábil del suelo, lo que limitó la respuesta al agregado de P. Otro factor a tener en cuenta y que pudo influir en la baja respuesta fue la competencia por parte de la cebadilla, que tenía una alta población y si respondió al P. Un resultado similar fue reportado por Acuña y Wilman (1993), trabajando con un suelo con 9 mg l^{-1} de P extractable, clasificado como bajo según el método ADAS IndexO. Estos autores encontraron que en una pastura de primer año de raigrás y trébol blanco fertilizadas con 100 kg/ha^{-1} de superfosfato triple, el raigrás se benefició más en términos de rendimiento que el trébol blanco. No se han encontrado equivalencias de este método (ADAS IndexO) con PBray1.

Los sitios Tossi y San José presentaban valores intermedios de P lábil y compartían al raigrás como gramínea de la mezcla forrajera y trébol blanco como una de las leguminosas. En estos sitios el trébol blanco tendió a incrementar su rendimiento con la dosis de P, aunque esta tendencia fue solo significativa en el sitio con menor nivel de PBray1 de los tres restantes (Tossi). El raigrás, en cambio, mostró una tendencia de caída de rendimiento frente al aumento de la dosis, pero la misma no fue significativa en ningún sitio (Figura 6 y Cuadro 3). Lo mismo le ocurrió al lotus, pero en esta especie esta caída fue significativa nuevamente en Tossi. Estos dos comportamientos de descenso de rendimiento posiblemente ocurrieron por una mayor competencia de trébol blanco. En Tossi, el trébol rojo mostró la misma tendencia no significativa de caída de rendimiento al agregado de P, aunque cabe señalar que la población de esta especie en la pastura fue muy irregular tanto en tiempo como en espacio. Un resultado similar fue observado por Bermúdez et al. (2008), trabajando en suelos con un valor de P lábil de $4,5 \text{ ppm}$ de P extractable en ácido cítrico. Estos autores reportaron que, en mejoramientos en cobertura, el trébol blanco aumentó su rendimiento con el aumento en la dosis de P mientras que lotus, si bien primero mostró un leve aumento con la primera dosis de P, luego disminuyó cayendo por debajo de los rendimientos del testigo. Esto fue observado en un periodo de 5 años de evaluación.



Nótese que los distintos sitios tuvieron diferente número de cortes (NP 2 cortes, Tossi 3 cortes, San José 2 cortes, Candil 3 cortes). La significancia estadística de estos resultados se muestra en el Cuadro 3. Los sitios están ordenados en orden creciente según nivel de PBray1.

Figura 6. Respuesta de la producción acumulada de MS (kg/ha promedio por especie) al agregado de P en pasturas de segundo año

Cuadro 3. ANAVA y contrastes por especie para los cuatro sitios

Sitio	Especie	CV	p valor	C1	C2	C3
				p valor		
NP	Trébol blanco	36,3	NS	NS	NS	NS
	Cebadilla	13,0	NS	0,0378	0,0404	NS
Tossi	Trébol blanco	14,8	0,0058	0,0009	0,0027	0,0213
	Lotus	19,6	NS	0,0403	0,0409	NS
	Trébol rojo	36,2	NS	NS	NS	NS
	Raigrás	27,3	NS	NS	NS	NS
San José	Trébol blanco	18,3	NS	NS	NS	NS
	Lotus	45,1	NS	NS	0,0547	NS
	Raigrás	48,5	NS	NS	NS	NS
Candil	Trébol blanco	5,5	NS	NS	NS	NS
	Festuca	22,1	NS	NS	NS	NS

Los análisis de varianza fueron realizados para la producción total de MS producida por cada especie durante el periodo de evaluación

NS: no significativo ($P > 0,05$), aunque se agregaron los valores cercanos superiores al límite.

CV: coeficiente de variación

P: efecto principal del tratamiento

C1: contraste "cero vs. resto"

C2: contraste "lineal"

C3: contraste "cuadrático"

Nótese que el contraste 1 no es ortogonal con los otros dos.

A pesar de que la tendencia a un descenso del rendimiento de raigrás con la dosis de P_2O_5 no fue significativa para la suma de los cortes, sí se observó una disminución significativa en el corte 3 de Tossi (Cuadro 4). Además, también se observó una caída significativa de la relación raigrás/trébol blanco con la fertilización fosfatada en algunos cortes o en la suma de ellos en los sitios Tossi y San José (Cuadro 5).

En el sitio Candil la gramínea fue festuca, una especie perenne y no anual como en los sitios anteriores. En este sitio fue donde existió el mayor nivel de PBray1, y posiblemente por esto no existió respuesta ni de trébol blanco ni de festuca a la dosis de P (Cuadro 3). El hecho que la festuca no haya decrecido su rendimiento por competencia al trébol blanco posiblemente se deba a que el trébol blanco tampoco aumentó su rendimiento, aunque no es posible descartar

que esta especie tenga una mayor capacidad de competencia con el trébol blanco por ser perenne. Al igual que en el caso de cebadilla, tampoco se han encontrado publicaciones científicas acerca del nivel crítico de esta especie, pero existen reportes de experimentos en donde en un suelo muy pobre en P (3 ppm PBray1) la festuca aumentó su biomasa y su habilidad para competir con *Lotus tenuis* cuando se le agregó P (Mendoza et al., 2016).

Normalmente se asume que un aumento en el rendimiento de las leguminosas tendría consecuencias positivas en la fijación de nitrógeno (Brock, 1973), por lo que otras especies como las gramíneas podrían verse beneficiadas de este efecto. Por tanto, la fertilización fosfatada de una mezcla también contribuiría al rendimiento de la pastura por la mayor transferencia de N a las gramíneas. Sin embargo, los presentes resultados muestran que las relaciones de competencia entre las especies de la mezcla no son tan sencillas. Podría inferirse que esto se debe a que cuando aumenta el crecimiento de trébol blanco por la fertilización fosfatada puede decrecer el rendimiento de otras especies de la mezcla, tanto gramíneas como leguminosas, sobre todo a niveles medios a altos de PBray1.

La dominancia del trébol blanco pudo condicionar en cierto modo la supervivencia de la pastura, dado que ésta leguminosa es bastante susceptible a diversos tipos de estrés ambientales, pudiendo ocurrir muerte de estolones en mayor medida que la formación de nuevos estolones (Caradus et al., 1996). Esto podría provocar que la pastura pierda la leguminosa y se creen espacios para la invasión de malezas especialmente en verano en ocurrencia de déficit hídrico.

Por tanto, la sobre-fertilización fosfatada puede no solo tener consecuencias ambientales negativas sobre la calidad del agua, sino también productivas, al disminuir la persistencia de la pastura mezcla. Esto se debe a que se puede favorecer la dominancia de las leguminosas más exigentes en P, al menos en mezclas con gramíneas anuales. En resumen, la estrategia de manejo más racional sería mantener niveles de PBray1 inferiores al nivel crítico de las especies más exigentes en P de la mezcla (Kaiser et al., 2011).

En suelos pobres en materia orgánica el aporte de N por transferencia desde la leguminosa hacia las gramíneas puede no ser suficiente para cubrir las necesidades de esta última, lo cual le daría una mayor ventaja competitiva a la leguminosa si se sobre-fertilizara con P. Por tanto, en algunos casos podría ser necesario recurrir a un uso táctico de la fertilización nitrogenada para mantener

equilibrada a la mezcla, aunque con dosis moderadas para no inhibir la fijación de N (Willoughby 1954, Harris 1987, Høgh-Jensen et al. 2001).

Cuadro 4. ANAVA y contrastes para las especies con efectos significativos en rendimiento por corte y por especie

Sitio	Corte	Especie	----- kg/ha P ₂ O ₅ -----				ANOVA	C1	C2	C3
			0	40	80	120				
			----- MS (kg/ha) -----							
NP	1	Cebadilla	734,9	1348,6	1562,9	1706,4	0,0106	0,0024	0,0140	0,0342
		Trébol blanco	395,9	566,1	516,2	428,9	NS	0,0875	0,0509	NS
Tossi	1	Raigrás	263,3	340,3	286	199,3	0,0565	NS	NS	NS
		Trébol blanco	205	445,7	342,3	456,7	0,0355	0,0103	NS	0,0144
	2	Raigrás	326	456,3	578,7	534,3	NS	0,0328	0,0492	NS
		Trébol blanco	454	920,7	858,33	1035	0,0111	0,0023	0,0249	0,0081
	3	Raigrás	-	854,23	1040,4	703,9	0,0767	0,0292	NS	0,0227
		Trébol blanco	597,2	1015,7	1143,9	976,2	NS	0,0471	0,0435	NS
Trébol rojo		1495	680,5	845	753,2	NS	0,0234	0,0598	0,0522	
San José	1	Trébol blanco	1661	1676,6	2085,1	1982,6	0,0042	0,0089	0,0096	NS
Candil	1	Festuca	289,2	321,7	242,5	326,7	0,0647	NS	NS	0,0517
		Trébol blanco	1548,1	1500,9	1652,7	1597,5	0,0140	NS	NS	0,0038

NS: no significativo (P>0,05), aunque se agregaron los valores cercanos superiores al límite.

CV: coeficiente de variación

P: efecto principal del tratamiento

C1: contraste "cero vs. resto"

C2: contraste "lineal"

C3: contraste "cuadrático"

Nótese que el contraste 1 no es ortogonal con los otros dos.

4.1.2 Cambio de las proporciones de las especies de la mezcla en relación a trébol blanco

El trébol blanco fue la especie dominante en la mezcla, sobre todo cuando el nivel de PBray1 se encontraba por encima de 8 ppm. Por tanto, se resolvió estudiar la variabilidad de la relación de las demás especies con trébol blanco, tanto entre sitios como dentro de un sitio y con la dosis de P (Cuadro 5).

Cuadro 5. ANAVA y contraste en las relaciones significativas de las especies de la mezcla con trébol blanco, para los sitios Tossi y San José

Sitio	Corte	Relación especie	-----kg/ha P ₂ O ₅ -----				ANAVA	C1
			0	40	80	120		
			-----MS (kg/ha) -----				-----p valor-----	
NP	1+2	Cebadilla/trébol blanco	7,51	7,35	6,93	6,66	NS	NS
Tossi	3	Lotus/trébol blanco	3,31	0,24	0,22	0,28	NS	NS
		Raigrás/ trébol blanco	2,60	0,91	0,91	0,74	0,0439	0,0089
		Trébol rojo/ trébol blanco	3,00	0,80	0,70	0,80	NS	0,0220
	1+2+3	Raigrás/trébol blanco	0,99	1,11	0,80	0,68	NS	0,0547
San José	1	Raigrás/trébol blanco	0,48	0,43	0,43	0,54	NS	NS
	2	Raigrás/trébol blanco	0,45	0,56	0,59	0,93	NS	NS
	1+2	Raigrás/trébol blanco	0,46	0,49	0,51	0,74	0,0558	NS
Candil	1+2+3	Festuca/trébol blanco	0,38	0,34	0,33	0,29	NS	NS

NS: no significativo ($P > 0,05$), aunque se agregaron los valores cercanos superiores al límite.

CV: coeficiente de variación

P: efecto principal del tratamiento

C1: contraste "cero vs. resto"

En suelos con muy bajos contenidos de PBray1 el trébol blanco no pudo establecerse correctamente en la pastura y predominó la cebadilla, la cual respondió más al fósforo que el propio trébol blanco. En suelos con bajos contenidos de PBray1 (Tossi) la fertilización fosfatada modificó la relación de los componentes de la pastura, ya que el trébol blanco respondió más que las demás especies, desbalanceando la mezcla. En cambio, en los demás sitios con niveles superiores a 12 ppm de PBray1, no existió un cambio importante en la relación otras especies/trébol blanco, debido a que esta relación ya era muy baja (predominaba el trébol blanco).

Por tanto, la relación gramínea/trébol blanco estuvo determinada principalmente por el nivel inicial de PBray1 de la unidad de manejo, disminuyendo en forma exponencial decreciente en función del nivel de PBray1 (Figura 7), lo que indica una mejora rápida en la competencia de trébol blanco a medida que aumentan los niveles de P disponible del suelo. Los principales descensos de esta relación se produjeron en el entorno de 4 a 8 ppm de PBray1, o sea, en el rango muy bajo a bajo de P disponible en suelo (Figura 8). De acuerdo a estos resultados, para la mayoría de las praderas bajo uso intensivo (lechería, engorde) de la cuenca del río Santa Lucía, la relación gramínea/trébol blanco no sería afectada por la dosis de P, ya que los valores de PBray1 ya están generalmente en el rango alto. Pero este resultado también indicaría que las relaciones de otras especies/trébol blanco igualmente tenderían a ser bajas.

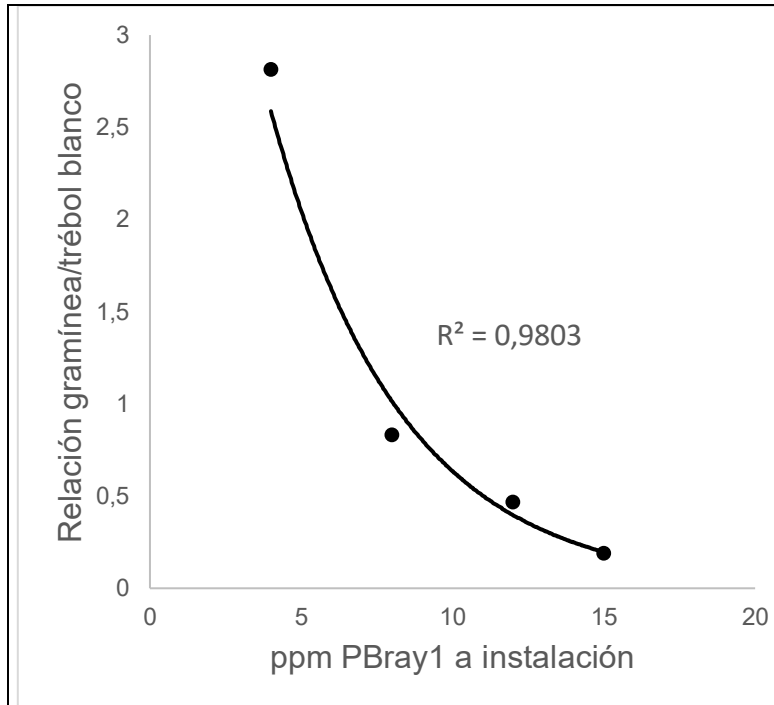


Figura 7. Relación gramínea/trébol blanco según nivel de PBray1 a instalación del ensayo

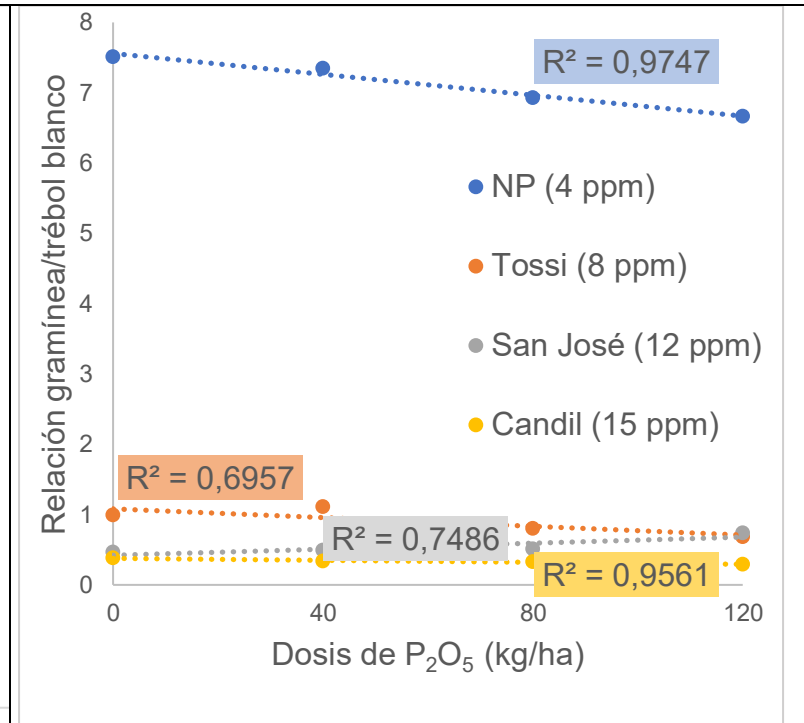


Figura 8. Relación gramínea/trébol blanco según dosis de P para sitios con diferentes niveles de PBray1 a instalación del ensayo

4.1.3 Respuesta de la relación gramínea/leguminosa a la dosis de P

La relación gramínea/leguminosa de 3 de los 4 sitios (excepto NP) fue menor a 1, por lo cual dominaron las leguminosas. Esta situación no sería la típica que se esperaría observar en una pastura mezcla, donde la MS de la gramínea debería ser mayor a la de la leguminosa. Esto podría suceder en situaciones de pastoreo muy laxas o esporádicas y con poca disponibilidad de N, donde las leguminosas tienden a aumentar su importancia dentro de la mezcla (Carámbula, 2010b). Sin embargo, esta situación no sería esperable para estos tres sitios, ya que estas praderas eran utilizadas para producción lechera (Tossi) o ganadera intensiva (Candil y San José) previo a instalación de los ensayos. Las relaciones gramínea/leguminosa obtenidas en el presente trabajo, en cambio, parecen depender del P lábil inicial de cada sitio, disminuyendo el cociente gramínea/leguminosa a medida que aumentó la dosis de P solamente en aquellos sitios con niveles bajos a muy bajos de PBray1 a instalación (Figura 8).

Cuadro 6. Relaciones gramínea/leguminosa por sitio para los cortes 1 y 2

Relación gramínea/leguminosa								
Sitio	NP		Tossi		San José		Candil	
Dosis	Corte 1	Corte 2	Corte 1	Corte 2	Corte 1	Corte 2	Corte 1	Corte 2
0	1,86	13,1	0,45	0,31	0,46	0,41	0,19	0,18
40	2,38	15,17	0,51	0,31	0,61	0,40	0,21	0,28
80	3,03	11,85	0,44	0,38	0,28	0,53	0,15	0,12
120	3,98	8,52	0,24	0,32	0,40	0,19	0,2	0,21

A su vez en el sitio con muy bajo contenido de PBray1 (NP), en el corte 1 la relación gramínea/leguminosa aumentó con la dosis, mostrando una tendencia inversa a los demás sitios, y luego al pasar del corte 1 al 2 también aumentó bruscamente debido a que el trébol blanco no pudo sobrevivir por el bajo nivel de P disponible. En cambio, en Tossi y San José, los sitios con niveles intermedios de PBray1 la relación tendió a bajar entre cortes, es decir, relativamente hubo más leguminosas en el corte 2. Además, en estos dos sitios esta relación también cayó con la dosis en alguno de los cortes evidenciando que sin fertilización no se maximizaba la competencia de la leguminosa. En Candil, en cambio, el sitio con mayor nivel de PBray1, esta relación ya no se modificó entre cortes, quizás debido a que el P ya no era limitante para que dominara la leguminosa a partir del primer corte. En resumen, cuando el P no fue limitante la pastura alcanza una dominancia

de leguminosa de aproximadamente 5 a 1 en relación a la gramínea en términos de MS.

4.1.4 Respuesta a la fertilización fosfatada en materia seca total

La respuesta en materia seca al agregado de P en los distintos cortes de los cuatro sitios dependió del nivel inicial de PBray1 (Cuadro 5). En el sitio NP, con el menor nivel de PBray1 (4 ppm), la respuesta fue significativa en todos los cortes. Por tanto, el nivel de PBray1 de este sitio no fue capaz de cubrir los requerimientos de la pastura (Berardo y Marino, 2000). En Tossi, con el nivel siguiente de PBray1, la respuesta a P fue significativa solamente en el corte 2. En este corte también fueron significativos todos los contrastes (diferencia de tratamientos contra testigo, ajuste lineal y ajuste cuadrático). Para el corte 3 solo fueron significativos los contrastes C1 (0 vs. resto) y C2 (lineal). En los dos sitios con mayores niveles de PBray1 (San José y Candil) no hubo respuesta significativa en ningún corte. En la mayoría de los sitios y cortes en los que hubo respuesta significativa, los contrastes más significativos fueron los contrastes C1 y C2. La excepción fue el corte 4 de Candil donde el contraste más significativo fue el C3 (cuadrático) aunque la probabilidad fue un poco mayor al 5%.

Si bien a primera vista tiene sentido que solo los dos sitios con los valores menores de PBray1 hayan respondido al agregado de P, no queda claro por qué los otros dos sitios no respondieron, dado que estos no alcanzaron el nivel crítico de PBray1 de la especie más exigente de la mezcla.

Cuadro 7. ANAVAs y contrastes del efecto de agregado de P en la producción de MS de las pasturas

Sitio	Corte	-----kg/ha P ₂ O ₅ -----				CV	P	C1	C2	C3
		0	40	80	120					
		MS (kg/ha)				-----p valor-----				
NP	1	1179,2	2119,1	2367	2312,7	14,36	0,0071	0,0013	0,0026	0,0238
	2	4313,4	4498,5	5033,2	4960,9	5,99	0,0523	0,0331	0,0144	NS
Tossi	1	936,9	1085,8	1008,9	1081,3	10,9	NS	NS	NS	NS
	2	1454,9	2086,1	2301	2346,2	10,2	0,0065	0,0013	0,0017	0,0511
	3	4353,3	4371,8	3789	3196,1	11,85	NS	0,0480	0,0466	NS
	4	2911,4	2732,9	3470,3	3066,3	15	NS	NS	NS	NS
	5	1296,5	1160,8	1521,8	1517,2	23,01	NS	NS	NS	NS
San José	1	2748,3	3064,1	3064,3	3124,9	10,41	NS	NS	NS	NS
	2	5361,6	4678,4	5215	4361,1	18,43	NS	NS	NS	NS
Candil	1	1965,8	1972,6	2050,6	2057,5	7,74	NS	NS	NS	NS
	2	2007,2	2141,6	2223,1	2322,7	18,39	NS	NS	NS	NS
	3	4468,9	3965,9	4570,5	4324,8	8,13	NS	NS	NS	NS
	4	1979,8	1753,1	1870,5	2446,8	14,75	NS	NS	NS	0,0575

NS: no significativo (P>0,05), aunque se agregaron los valores cercanos superiores al límite.

CV: coeficiente de variación

P: efecto principal del tratamiento

C1: contraste "cero vs. resto"

C2: contraste "lineal"

C3: contraste "cuadrático"

Nótese que el contraste 1 no es ortogonal con los otros dos.

Como en los sitios San José y NP se realizaron solo dos cortes, mientras que en los otros dos entre cuatro y cinco (Candil y Tossi, respectivamente), y además la mayor respuesta a la fertilización fosfatada sería esperable en los primeros meses post-fertilización, se resolvió evaluar en todos los sitios la respuesta de la producción total de esos dos primeros cortes (aunque no fueron simultáneos). De esta forma se puede comparar de manera más uniforme todos los sitios entre sí. Los resultados gráficos (Figura 9) muestran la misma tendencia que la observada en los análisis por corte, pero la relación inversa entre respuesta y nivel de PBray1 se manifestó en forma aún más clara. Es decir, los sitios con niveles inferiores de PBray1 respondieron a la fertilización, mientras los otros dos con niveles mayores no mostraron respuesta apreciable, a pesar de que en principio todavía sería esperable que existiera respuesta. Los resultados de los anava (Cuadro 8) concuerdan con la respuesta al agregado de P observada en la Figura 9. Para el total de estos dos cortes, los contrastes más significativos fueron nuevamente C1 y C2. Estos resultados confirman que el valor de PBray1, aún muestreado de los primeros 7,5 cm de suelo, es capaz de indicar la probabilidad de respuesta al agregado de P de un sitio determinado.

Cuadro 8. ANAVA y contrastes por sitio para rendimiento, acumulados de los cortes 1 y 2

Sitio	Corte	CV	P	C1	C2	C3
				-----p valor-----		
NP	1 y 2	6,52	0,0025	0,0006	0,0009	0,0329
Tossi	1 y 2	6,83	0,0012	0,0005	0,0007	0,0333
San José	1 y 2	11,24	NS	NS	NS	NS
Candil	1 y 2	8,82	NS	NS	NS	NS

NS: no significativo ($P > 0,05$)

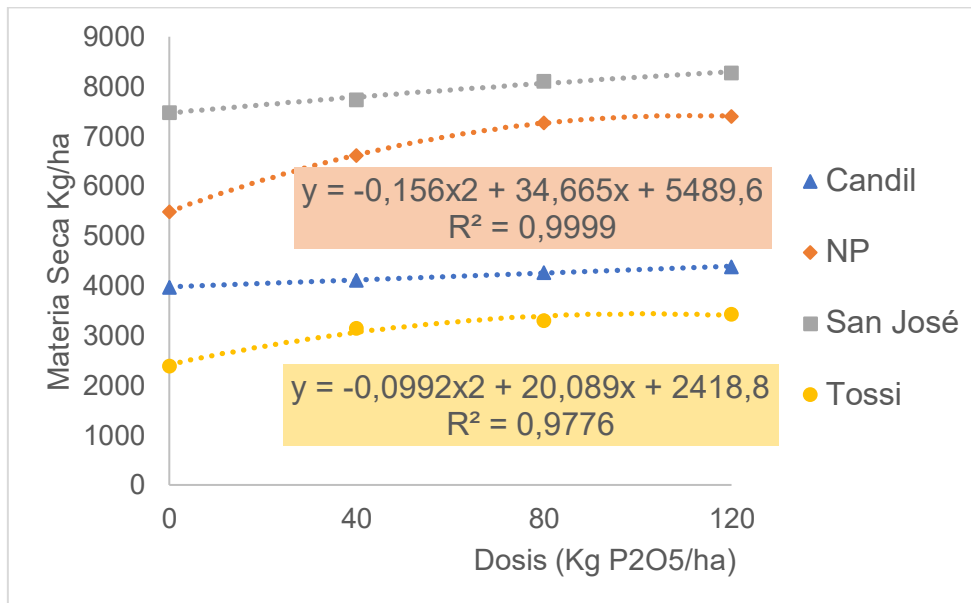
CV: coeficiente de variación

P: efecto principal del tratamiento

C1: contraste "cero vs. resto"

C2: contraste "lineal"

C3: contraste "cuadrático"



Nota: cada punto representa el promedio de la producción acumulada de los dos primeros cortes.

Figura 9. MS acumulada en kg/ha según dosis para los dos primeros cortes de cada sitio

4.2 NIVELES CRÍTICOS DE P EN PASTURAS MEZCLA

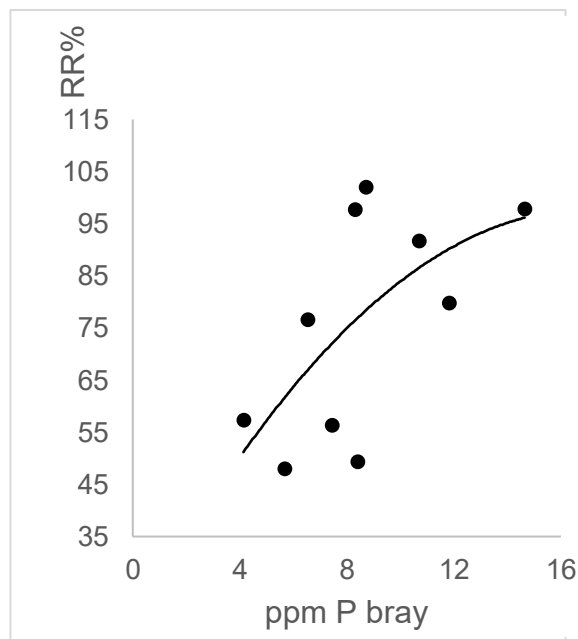
En la calibración de un análisis de suelo, para un cultivo y zona, importa su interpretación en términos de la predicción de la respuesta a la fertilización. En general se asume que el incremento de rendimiento será menor cuanto mayor sea el contenido original de P en suelo, estimado por análisis químico (Ron, 2003).

Se han estimado en otros estudios los niveles críticos (NC) de las especies puras (Bordoli, 1998) y se ha optado por tomar como NC de una pastura mezcla el de la especie pura con mayor NC. Pero no se ha estudiado si los NC de las especies puras cambian cuando están en una pastura mezcla, en condiciones de mayor competencia, ni tampoco si el NC de la pastura al menos en rendimiento de forraje coincide con el de la especie más productiva.

En este trabajo las estimaciones de NC se realizaron a partir de dos relaciones: la relación entre el incremento de rendimiento (Inc. Rend.) y el nivel de PBray1 inicial en suelo; y entre el rendimiento relativo (RR%) y el nivel de PBray1 inicial en suelo. Cuando una de estas dos relaciones mostró un pobre

ajuste, la estimación de NC se hizo solamente a partir de la mejor relación. Cuando las dos relaciones tuvieron un buen ajuste el NC se estimó de ambas. En el caso de Lotus ninguna de las dos relaciones mostró un ajuste razonable, por lo cual se resolvió no realizar esta estimación. Cabe señalar además que el número de datos disponible para realizar dichas estimaciones fue bajo, por lo cual las mismas no son definitivas, pero se presentan para contrastarlas con los NC nacionales.

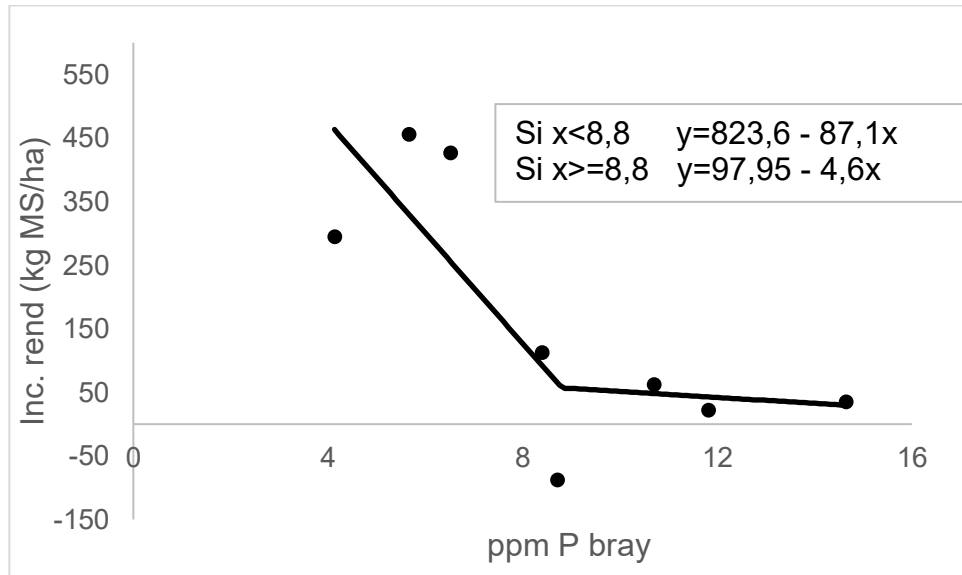
4.2.1 Niveles críticos de P para especies individuales dentro de pasturas mezcla



Nota: el valor de R^2 fue 0,40. Cada punto representa el promedio por tratamiento de cada corte. En los sitios Tossi y Candil se incluyeron 3 cortes, mientras que en los otros dos solo se hicieron dos cortes. El valor en el eje de las ordenadas representa la concentración de PBray1 del tratamiento testigo de cada corte a la profundidad de 0-7,5 cm.

Figura 10. Rendimiento relativo para trébol blanco en función de PBray1 a instalación

Se estimaron las relaciones entre incremento de rendimiento y rendimiento relativo de trébol blanco creciendo en mezcla, con respecto al nivel de PBray1. Se observó una mejor relación con rendimiento relativo, por lo cual se estimó el nivel crítico para esta relación (Figura 10). El valor determinado para esta especie dentro de la mezcla fue de 17 ppm PBray1.

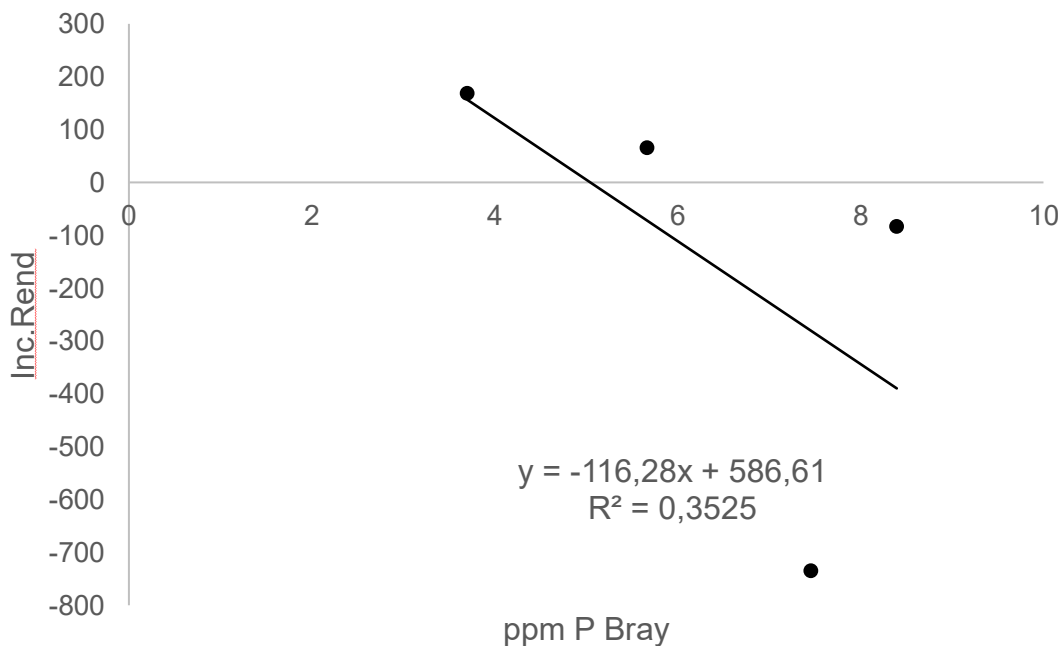


Nota: el valor de R^2 fue de 0,66. Cada punto representa el promedio por tratamiento de cada corte. En todos los sitios se incluyeron dos cortes debido a que el tercer corte de Tossi y Candil estaban dominados por leguminosas. El valor en el eje de las ordenadas representa la concentración de PBray1 del tratamiento testigo de cada corte a la profundidad de 0-7,5 cm.

Figura 11. Relación entre incremento de rendimiento en gramíneas y PBray1 a instalación

En las gramíneas (cebadilla, raigrás y festuca), se estimó un nivel crítico de PBray1 para todas ellas en conjunto. La relación más fuerte encontrada fue opuesta a la del trébol blanco, por lo cual en este caso se utilizó el incremento de rendimiento como indicador de respuesta a agregado de P (Figura 11). Se ajustó un modelo lineal-lineal a esta relación, y el nivel crítico estimado fue de 9 ppm de PBray1.

En el caso de lotus no se presentan las relaciones de incremento de rendimiento versus ppm de PBray1 debido a que las mismas fueron muy pobres y tendieron a ser negativas, aunque no significativas. Por tanto, no se pudo ajustar ningún modelo ni se pudo estimar el nivel crítico, ya que este sería el menor nivel de PBray1 observado. Quizás esto se debió a que, a mayores niveles de PBray1, mayor competencia ejercía el trébol blanco y el rendimiento del lotus disminuyó.



Nota: cada punto representa uno de los cuatro cortes del sitio Tossi, que fue el único que contaba con esta especie. El valor en el eje de las ordenadas representa la concentración de PBray1 del tratamiento testigo de cada corte a la profundidad de 0-7,5 cm.

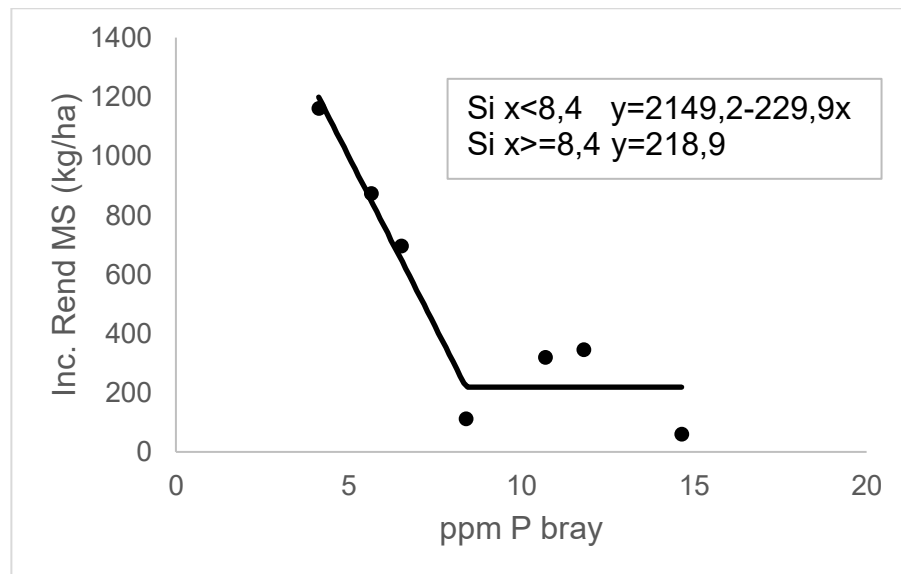
Figura 12. Relación entre incremento de rendimiento y PBray1 a instalación para trébol rojo

Los datos para trébol rojo (Figura 12) fueron menos consistentes ya que solo una pastura tenía esta especie en su mezcla, y rápidamente desapareció de la mezcla (solo en algunos cortes estuvo presente). El nivel crítico encontrado para esta especie fue de 5 ppm PBray1, por tanto, con estos pocos datos no resulta razonable tratar de estimar el NC de trébol rojo.

4.2.2 Niveles críticos para pasturas mezcla

Analizando la información conjunta de todos los sitios a nivel de corte, se estimó el NC de pasturas para la producción total de forraje, es decir, para la mezcla de gramíneas y leguminosas.

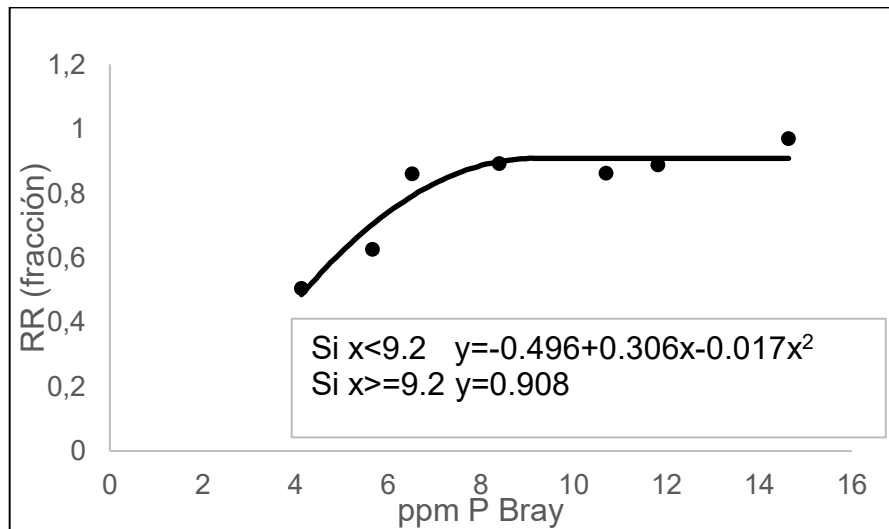
Cuando se utilizó la relación incremento de rendimiento (eje Y) versus PBray1 (eje X) se observó que el mejor ajuste ($R^2 = 0,93$) se lograba con un modelo lineal plateau, determinando un nivel crítico de 8 ppm.



Nota: el valor de R^2 fue de 0,93, cada punto representa el promedio por tratamiento para los dos primeros cortes de cada sitio. El valor en el eje de las ordenadas representa la concentración de PBray1 del tratamiento testigo de cada corte a la profundidad de 0-7,5 cm. Se exceptuó el segundo corte del sitio San José (un punto) donde previamente habían ingresado animales e incrementaba mucho la variabilidad del rendimiento de la pastura.

Figura 13. Relación incremento de rendimiento y PBray1 a instalación para pasturas mezcla

También se determinó el NC a partir de la relación entre RR% y PBray1, ajustándose un modelo cuadrático-plateau con un R^2 de 0,89. En este caso, el nivel crítico fue de 9 ppm (Figura 14).



Nota: el valor de R^2 fue 0,89, cada punto representa el promedio por tratamiento para los dos primeros cortes de cada sitio. El valor en el eje de las ordenadas representa la concentración de PBray1 del tratamiento testigo de cada corte a la profundidad de 0-7,5 cm. Se exceptuó el segundo corte del sitio San José (un punto) donde previamente habían ingresado animales e incrementaba mucho la variabilidad del rendimiento de la pastura.

Figura 14. Relación rendimiento relativo y PBray1 a instalación para pasturas mezcla

Por tanto, los resultados de estas dos relaciones fueron concordantes resultando en un rango crítico de 8 a 9 ppm de PBray1 para la profundidad de 0 a 7,5 cm (Figura 13 y 14). Por encima de este rango, la probabilidad de respuesta en rendimiento de forraje por el agregado de fertilizante sería baja.

4.3 COMPARACIÓN DE NIVELES CRÍTICOS DE ORIGEN NACIONAL E INTERNACIONAL CON LOS OBTENIDOS EN EL PRESENTE ESTUDIO

Como fue mencionado, la bibliografía nacional sugiere valores de niveles críticos para las especies trabajadas en el presente estudio al momento de la simbra. A continuación, se comparan estos niveles críticos de leguminosas y gramíneas nacionales con los sugeridos por el presente estudio, estimados dentro de una mezcla y al momento de la refertilización de segundo año. Además, se presenta el NC observado para la pastura mezcla, también al momento de la refertilización. Cabe aclarar que los muestreos de suelo para este trabajo fueron realizados hasta una profundidad de 7,5 cm de suelo, siendo esta otra diferencia con respecto a la profundidad en la cual están fundadas las recomendaciones nacionales para las especies puras, basadas en muestreos de 15 cm de profundidad de suelo.

Cuadro 9. Comparación entre niveles críticos encontrados para especies puras a la siembra por diversos autores y los estimados en este trabajo para las mismas especies creciendo en pasturas mezcla al momento de la refertilización de segundo año

Especie	Niveles críticos para especies puras para muestreos de suelo a 0-15 cm (Bordoli 1998, Carámbula 2010a)	Niveles críticos encontrados para estas especies dentro de pasturas mezcla para muestreos de suelo a 0-7,5 cm
	-----PBray1 (ppm)-----	
Lotus	10 - 12	Sin ajuste (8)
Trébol blanco	15 - 16	17
Trébol rojo	12 - 14	5
Gramíneas	8 - 10	9
Pastura mezcla	15-16	8-9

Nota: en pasturas mezcla generalmente se asume que el nivel crítico equivale al de la especie más exigente presente en la misma. En este caso se tomó el nivel crítico del trébol blanco.

Mas allá de las diferencias de momento de muestreo con respecto al ciclo de la pastura, el nivel crítico estimado dentro de la mezcla para trébol blanco a la profundidad de 0-7,5 cm (17 ppm) fue cercano al valor de 15-16 ppm recomendado por la bibliografía nacional para esta especie creciendo pura a la profundidad de 0-15 cm (Bordoli 1998, Carámbula 2010a). De acuerdo a estos resultados (Cuadro 9), el nivel crítico de esta especie no variaría creciendo en pasturas puras y en mezcla, y además no se vería afectado ni por el momento (siembra vs. refertilización) ni por la profundidad de muestreo. Esto tendría que ser verificado por otros estudios.

Por otra parte, los NC citados por la bibliografía nacional son inferiores a los utilizados en el estado de Oregón en EEUU. Hart et al. (1996) proponen un NC para trébol blanco de 30 ppm PBray1, recomendando dosis de entre 112 y 67 kg/ha de P₂O₅ cuando el nivel de PBray1 se encuentra entre 0 y 15 ppm respectivamente, y de entre 67 y 0 kg/ha de P₂O₅ cuando el nivel de PBray1 se encuentra entre 15 y 30 ppm. Cabe señalar, además, que en la bibliografía

internacional consultada no se hace diferencia entre niveles críticos a siembra y a refertilización.

En cambio, tanto para lotus como para trébol rojo, los NC estimados dentro de la mezcla fueron inferiores al rango de valores citados por la bibliografía de 12-14 ppm (Bordoli 1998, Carámbula 2010b). Si bien las estimaciones para estas dos especies en el presente trabajo no fueron confiables debido al bajo número de casos, la diferencia clara de niveles críticos cuando estas dos especies crecen puras o en mezcla podría deberse a la competencia dentro de la mezcla entre lotus y trébol rojo con trébol blanco. Como fue evidenciado previamente, a medida que aumentaba la fertilización con P aumentaba la dominancia de trébol blanco y se reducía la proporción de lotus y trébol rojo en la mezcla. Esto pudo haber influido en la caída abrupta de incremento de rendimiento observada en Figura 14. Estos resultados pueden ser explicados asumiendo que el trébol blanco fue la especie más competitiva, por lo cual no presentó diferencias de NC cuando creció en mezcla con respecto a cuando crece pura. En cambio, las otras leguminosas no fueron capaces de competir con el trébol blanco en mezcla, y cuanto más se incrementó el nivel de PBray1 más disminuyó el crecimiento de estas especies. De todas maneras, estos resultados deben ser comprobados con estudios adicionales.

A nivel internacional, precisamente para el estado de Minnesota, Kaiser et al. (2011) mencionan un NC para lotus y trébol rojo de 20 ppm, recomendando dosis de 100 kg/ha de P_2O_5 cuando el nivel de PBray1 está entre 0 y 5 ppm y de 17 kg/ha de P_2O_5 cuando el nivel de PBray1 se encuentre entre 16 y 20 ppm. Estas recomendaciones están basadas en producciones de 5,5 ton/ha y una profundidad de muestreo de 6 pulgadas (15 cm).

En el caso de las gramíneas, los niveles críticos observados dentro de la mezcla fueron similares a los valores citados por la bibliografía nacional que se ubican entre 8 y 10 ppm de PBray1 (Bordoli 1998, Carámbula 2010a). Por tanto, tampoco parecen variar los niveles críticos de las gramíneas creciendo puras o en mezcla, ni ser afectadas por la profundidad de muestreo. Cabe señalar que en este estudio los niveles críticos encontrados corresponden a una mezcla de gramíneas anuales (cebadilla y raigrás) y perennes (festuca), y no se puede descartar que existan diferencias de niveles críticos entre ellas.

Es importante destacar que estos niveles críticos nacionales para gramíneas son también inferiores a los recomendados en Iowa por Mallarino et al. (2013). En el caso de *Poa* este valor es de 15 ppm, mientras que para gramíneas altas como festuca y sorgos forrajeros se utilizan NC de 20 ppm para PBray1. Las dosis de P_2O_5 recomendadas en Iowa por estos autores para

gramíneas perennes invernales, estivales y para sorgos forrajeros, son también superiores a las recomendaciones nacionales. Cuando el destino es la henificación se recomiendan dosis de 100 kg/ha de P_2O_5 para suelos con valores entre 0 y 8 ppm de PBray1, y de 67 kg/ha de P_2O_5 para suelos con valores entre 9 y 15 ppm PBray1. Cuando en cambio el destino es pastoreo, dichos autores recomiendan reducir estas dosis a dos tercios de los valores mencionados. Para el estado de Minnesota, Kaiser et al. (2011) recomiendan para gramíneas un NC de 20 ppm PBray1, variando la dosis a agregar según el nivel de producción.

Con respecto a las pasturas mezclas de gramíneas y leguminosas, actualmente el criterio predominante es fertilizar la pastura mezcla en base al NC de la especie componente de mayores requerimientos. Pero de acuerdo a los resultados de este trabajo, el nivel crítico de P lábil de una pastura mezcla compuesta de gramíneas y leguminosas sería inferior a este valor (Cuadro 9), y se ubicaría cercano al valor de NC de la gramínea. El menor valor de NC encontrado en este trabajo coincide, en parte, con la argumentación de Bordoli (1998) de que en praderas que incluyen más de una leguminosa, la dosis de P a aplicar es un factor de manejo clave que puede afectar el balance de la mezcla.

Comparando esta información con el ámbito internacional, para pasturas mezcla de trébol, lotus y gramíneas, el valor de NC recomendado para el estado de Iowa por Mallarino et al. (2013) es de 20 ppm PBray1, como ya fue mencionado anteriormente para otras especies. Dichos autores varían las dosis a agregar según el nivel de producción y si su destino es heno o pastura, siendo menor en este último caso. Para otro estado de EEUU, Minnesota, Kaiser et al. (2011) proponen en forma coincidente un NC para pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas de 20 ppm.

De acuerdo a los resultados de este estudio, la aplicación del primer criterio (especie con mayor NC) podría redundar en una “sobre-fertilización” que terminaría influyendo en la composición de la mezcla por competencia entre especies. Se debe tener en cuenta que el aumento de la concentración de P de las pasturas por sobre-fertilización puede llegar a niveles de consumo de lujo y podría generar un impacto ambiental negativo, al incrementarse el riesgo de exportación de P por escorrentía. En estas condiciones, las pasturas con muy elevados contenidos de P foliar no producirían incrementos adicionales en la productividad animal, sino que solo incrementarían el P devuelto en heces, aun por encima del 70% (Haynes y Williams, 1993) configurando una especie de círculo vicioso (Rowarth et al., 1988). Sin embargo, es importante cuantificar un nivel mínimo aceptable de P foliar para lograr un equilibrio entre la optimización de la fertilización y la calidad de la pastura.

En resumen, los NC internacionales tendieron a ser mayores a los nacionales, y a su vez similares para todas las especies de pradera y para siembra y refertilización. La excepción fue la pradera mezcla, en donde los NC internacionales fueron similares al criterio nacional de usar la especie con mayor NC.

Por otra parte, los NC nacionales tendieron a ser similares a los encontrados en este trabajo solo en el caso de trébol blanco y gramíneas. Esta similitud se verificó a pesar de las diferencias en la profundidad de muestreo entre este trabajo (0-7,5 cm) y la recomendación nacional de realizar muestreos a 0-15 cm. Con respecto a la profundidad de muestreo cabe mencionar también que, muestreos realizados hasta 7,5 cm de profundidad disminuirían el esfuerzo al tomar la muestra en el campo y el error de muestreo. Para trébol rojo y lotus, en cambio, los valores de NC encontrados en este trabajo fueron inferiores a los citados por la bibliografía nacional. Esto posiblemente se explique más por la competencia ejercida por trébol blanco dentro de la mezcla, que por la diferencia de profundidad de muestreo. Finalmente, en el caso de pradera mezcla, el menor NC encontrado en este trabajo parece haber estado influido por el peso de la fracción gramínea en la composición de la materia seca de la mezcla y, nuevamente, no tanto por las diferencias en profundidad de muestreo. De todas maneras, estos resultados iniciales deberían ser confirmados por estudios posteriores con mayor número de sitios y mayor tiempo de evaluación.

5. CONCLUSIONES

La respuesta de materia seca por especie estuvo predispuesta por el nivel de PBray1 en suelo que fue un factor determinante a la hora de observar las respuestas de las especies a la refertilización fosfatada, siendo la especie más favorecida por este manejo el trébol blanco. En general la tendencia muestra que a menor nivel de PBray1 mayor fue la respuesta. La excepción fue el sitio NP con muy bajo contenido de PBray1 (4 ppm) en donde el trébol blanco no pudo establecerse correctamente, posiblemente por otras limitantes como un fuerte déficit hídrico sumado a la baja disponibilidad de P. En los sitios Tossi y San José con niveles bajos y medios de PBray1 en suelo (8-12 ppm), el trébol blanco respondió al agregado de P y modificó las relaciones de las demás especies de la pastura en relación a trébol blanco. Por otro lado, en Candil, el sitio con contenidos medio-alto de PBray1 (15 ppm) el trébol blanco no modificó significativamente las relaciones mencionadas, ya que la respuesta del propio trébol blanco fue escasa.

La respuesta en materia seca total dependió también del nivel de PBray1 siendo clara la mayor respuesta cuando el contenido de P en suelo fue menor y disminuyendo o siendo nula la significancia de la respuesta al agregado de P cuando el nivel de PBray1 superó las 8-9 ppm.

Si bien existe poca información respecto a los NC de las especies cuando crecen dentro de una pastura mezcla, los niveles estimados en el presente trabajo presentan algunas similitudes y algunas diferencias con respecto a los existentes en la bibliografía nacional e internacional. Un aspecto que se debe tener en cuenta en estas comparaciones es que los muestreos de suelos realizados en este trabajo fueron en la capa de 0-7,5 cm de suelo, mientras que las recomendaciones existentes fueron estimadas para una profundidad de 0-15 cm. Esto ayudaría a reducir el esfuerzo realizado a la hora de tomar la muestra y también a disminuir el error de muestreo.

A pesar de la diferencia respecto a la profundidad de muestreo y la etapa de la pastura a la cual se estimaron los NC (siembra o refertilización de segundo año), los valores reportados por la bibliografía nacional para trébol blanco y gramíneas (15-16 y 10-12 ppm respectivamente) estuvieron muy cercanos a los encontrados en este trabajo (17 y 9 ppm respectivamente). Por otro lado, para otras especies como trébol rojo y lotus existieron grandes diferencias en el valor de NC, ya que las encontradas en este trabajo fueron muy bajas (< a 5 ppm) y esto puede ser explicado tanto por la falta de datos como por la competencia de trébol blanco dentro de la mezcla.

El nivel crítico calculado para la pastura mezcla fue de 8-9 ppm PBray1, un rango bastante bajo en comparación con cualquiera de los niveles críticos de las leguminosas componentes de la mezcla, con los cuales se realizan las recomendaciones de fertilización y refertilización de pasturas. Esto podría explicarse por la importancia que tiene en la MS total de la pastura el componente gramínea.

Con respecto a la bibliografía internacional, la información considerada fue mayormente de EEUU, y presentó mayores diferencias en los NC con respecto a los sugeridos en el presente trabajo, ya que en todos los casos sus recomendaciones estaban en un rango de 20 a 30 ppm y son muy similares para la mayoría o grupos de especies. Estos valores están muy por encima de los valores nacionales. Además, en la bibliografía consultada no se hace referencia a diferencias entre los niveles críticos de siembra y refertilización.

Con los criterios actuales de fertilizar la especie con mayores requerimientos se podría estar logrando un aumento de la proporción de leguminosa en la mezcla. Por tanto, de acuerdo al nivel crítico para pasturas mezcla encontrado en este trabajo, si se pretende maximizar la productividad de MS se estaría utilizando fertilizante fosfatado en exceso. Además, esto podría redundar en un ahorro económico. Una optimización a la baja de la fertilización puede traer beneficios desde el punto de vista ambiental, disminuyendo la cantidad de P lábil en suelo y por lo tanto el soluble en agua.

De acuerdo con esta información, ya en suelos con contenidos de PBray1 similares a los del sitio Candil (15 ppm) la inclusión de especies como trébol rojo y lotus a la mezcla forrajera podría no ser siempre recomendable cuando el trébol blanco también está presente, ya que la pastura sería dominada por esta leguminosa. Por otra parte, si no se desea la dominancia de trébol blanco en la mezcla, que puede llegar a ser hasta 5 veces la MS de la gramínea, no se debería sembrar esta especie en suelos con niveles superiores a 15 ppm de PBray1.

6. RESUMEN

El fósforo (P) es el principal nutriente limitante para la producción de pasturas, especialmente para leguminosas. Los suelos del Uruguay se caracterizan por tener bajos niveles de P disponible para las plantas, por lo que la fertilización fosfatada es una medida de manejo muy usada en el sistema de producción. Las pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas son la base forrajera de actividades como la ganadería y la lechería debido a su buen aporte y balance de nutrientes. Sin embargo, existe escasa información a nivel nacional acerca del efecto de la fertilización en el balance de las especies dentro de las pasturas y en la productividad total de la misma. En este sentido, es normal asumir como criterio de fertilización el nivel de exigencia de la especie con mayores requerimientos de la pastura, implicando un uso excesivo del fertilizante fosfatado. Como consecuencia, esto redundaría en mayores costos de producción, un desbalance de la pastura mezcla gramíneas/leguminosas y, a mayor escala, afecta la calidad del agua generando efectos negativos (externalidades) en el medio ambiente. Los objetivos de este trabajo fueron: (1) analizar la respuesta en forraje producido (MS total y de las especies componentes) al agregado de fósforo en las pasturas, y (2) sugerir un valor de nivel crítico de P disponible en suelo para pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas y para las especies que componen estas pasturas de la zona de la cuenca del río Santa Lucía. Para ello, se realizaron 4 ensayos en diferentes sitios productivos en la zona de la cuenca del Río Santa Lucía sobre pasturas mezcla comerciales de segundo año. En cada sitio se delimitaron parcelas de 4 x 3 m a las cuales se aplicaron 3 dosis de P_2O_5 (0, 40, 80 y 120 kg/ha de superfosfato triple). Los ensayos se ordenaron con un diseño en bloques completos al azar (con tres repeticiones). Se realizaron cortes de las pasturas simulando pastoreo, pero sin devolución del forraje lo cual implicó una mayor extracción de nutrientes que en situaciones de pastoreo directo. Luego se determinó el rendimiento en kg/ha y la composición botánica. Los resultados mostraron que el efecto de la fertilización sobre la producción total de MS fue, de acuerdo a lo esperado, mayor en los sitios con menor valor de PBray1 y fue nula en el sitio con mayor nivel. A medida que se incrementó la dosis de fertilizante, se observó una tendencia a la predominancia del trébol blanco en la pastura, desplazando a otras leguminosas y algunas gramíneas. Se estimaron los niveles críticos (NC) para las pasturas mezcla y para cada especie componente de las mismas. El NC encontrado para pasturas mezcla fue en el rango de 8 a 9 ppm de PBray1. Para las especies trébol blanco, lotus y trébol rojo, los NC fueron 17, 8, y 5 ppm respectivamente, aunque para estas dos últimas especies el ajuste no fue satisfactorio y solo se tomó como válido el valor para trébol blanco. Para gramíneas el NC estimado fue 9 ppm. Estos resultados indican que el dato de concentración de PBray1 a 0-7,5 cm podría usarse para ajustar la refertilización con la ventaja sobre la profundidad tradicional de 0-15cm,

ya que el esfuerzo de muestreo por toma sería considerablemente menor. Por tanto, sería más probable que se sacaran más tomas por unidad de manejo disminuyendo así el error de estimación. De todos modos, estos resultados deberían confirmarse con futuros estudios que incluyan mayor cantidad de sitios y más tiempo de evaluación para lograr mejores estimaciones.

Palabras clave: Fósforo; Pasturas; Nivel crítico; Fertilización fosfatada; Respuesta en materia seca/ha.

7. SUMMARY

Phosphorus (P) is the main limiting nutrient for pasture production, especially for legumes. Soils in Uruguay are characterized by their low levels of plant-available P, so phosphate fertilization is a widely used resource within production systems. Mixed pastures of grasses and legumes are the forage base for livestock and dairy production, due to its high contribution and balance of nutrients. However, there are few national studies about these pastures' response to fertilization, resulting in inappropriate and/or inefficient practices. In this sense, it is common to use the higher specie requirement level as the fertilization criteria for the whole pasture, entailing an excessive use of phosphate fertilizer. This ends in higher production costs, an imbalance of the grass/legume mixture and, on a larger scale, damages water quality, negatively affecting the environment. The objectives for this study were: (1) to analyze the total and component species dry matter (DM) response to phosphorus addition in pastures, and (2) to suggest a P available in soil critical level for mixed grass and legume pastures and for each of their component species in Santa Lucía river basin. Four trials on second year commercial mixed pastures at different production sites in the Santa Lucia river basin were set up. On each site, plots of 4 x 3 m were delimited and three doses P_2O_5 (0, 40, 80 and 120 kg/ha of triple superphosphate) were applied. Trials were assigned using a randomized block design (3 repetitions). Pastures were cut simulating grazing but without returning the forage, which implied a greater extraction of nutrients compared to direct grazing. Then the yield in kg/ha and the botanical composition were determined. Results showed that the effect of fertilization over total DM production was, as expected, higher in sites with lower PBray1 values and null in the site with highest level. As the fertilizer dose increased, a trend towards the predominance of white clover in pasture was observed, displacing other legumes and some grasses. Critical levels (CL) were estimated for mixed pastures and for each of their component species. The CL found for mixed pastures was between 8 and 9 ppm of PBray1. As for the species white clover, lotus and red clover, the CL were 17, 8, and 5 ppm respectively, although the adjustment for the last two was not satisfactory and only the value for white clover was taken into account. For grasses the estimated CL was 9 ppm. These results suggest that PBray1 concentration data at 0-7.5 rather than 0-15 cm. could be used to adjust the refertilization, since the effort per sampling would be considerably less. Therefore, it would be better if more samples would be taken per management unit in order to decrease estimation errors. In any case, future studies should confirm these results increasing the number of sites and the evaluation time to achieve better estimations.

Keywords: Phosphorus; Pastures; Critical levels; Phosphate fertilization; Dry matter/ha yield.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acuña, P.; Wilman, D. 1993. Some effects of added phosphorus on perennial ryegrass white clover swards. *Grass and Forage Science*. 48(4):416 - 420.
2. Barnhart, S.; Mallarino, A.; Sawyer, J. 2013. *Fertilizing Pasture*. (en línea). Ames, Iowa, Iowa State University. Extension and Outreach Publications. 7 p. Consultado ago. 2018. Disponible en https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1085&context=extension_pubs
3. Berardo, A.; Marino, M. A. 2000. Fertilización fosfatada de pasturas en el sudeste bonaerense. (en línea). *Revista Argentina de Producción Animal*. 20(2):103 - 111. Consultado 14 oct. 2018. Disponible en <http://laboratoriofertilab.com.ar/Trabajos/Pasturas3.pdf>
4. Bermúdez, R.; Ayala, W.; Carámbula, M. 2008. Estrategias de fertilización fosfatada para mejoramientos de trébol blanco y lotus en suelos con B textural. In: Seminario de Actualización Técnica (2008, Montevideo). Fertilización fosfatada de pasturas en la Región Este. Montevideo, INIA. pp. 81 - 88 (Serie Técnica no. 172).
5. Betteridge, K.; Andrewes, W. G.; Sedcole, J. R. 1986. Intake and excretion of nitrogen, potassium and phosphorus by grazing steers. *The Journal of Agricultural Science*. 106:393 - 404.
6. Bordoli, J. M. 1998. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. In: Jornada de Fertilización en Cultivos y Pasturas (1998, Concepción del Uruguay, Entre Ríos). Trabajos presentados. Concepción del Uruguay, Entre Ríos, INTA. s.p.
7. Bracco, G.; Hernández, S. 2018. Relaciones entre diferentes métodos de estimación de fósforo lábil en suelos de la cuenca del río Santa Lucía y su implicancia en las recomendaciones de fertilización. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 109 p.
8. Bray, R.; Kurtz, L. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59(1):39 - 46.

9. Brock, J. L. 1973. Growth and nitrogen fixation of pure stands of three pasture legumes with high/low phosphate. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 16(4):489 - 491.
10. Caradus, J.; Woodfield, D.; Stewart, A. 1996. Overview and vision for white clover. *Special Publication - Agronomy Society of New Zealand*. no. 11:1 - 6.
11. Carámbula, M. 2010a. Pasturas y forrajes: potenciales y alternativas para producir forraje. *Montevideo, Hemisferio Sur*. t.1, 357 p.
12. _____. 2010b. Pasturas y forrajes: insumos, implantación y manejo de pasturas. *Montevideo, Hemisferio Sur*. t.2, 371 p.
13. Casanova, O.; Barbazán, M. 2002. *Fertilizantes*. Montevideo, Facultad de Agronomía. 76 p.
14. _____. 2008. Fertilizantes fosfatados. *In: Seminario de Actualización Técnica (2008, Montevideo). Fertilización fosfatada de pasturas en la región Este*. Montevideo, INIA. pp. 1 - 6 (Serie Técnica no. 172).
15. Castillo, J.; Ferreira, A.; Méndez, R. 2014. Evaluación de diferentes estrategias de fertilización N-P-K en diferentes variedades de arroz: Impacto a nivel productivo y económico. *In: Jornada Anual Arroz - Soja (2014, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2013-2014*. Montevideo, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 735).
16. Cate, R. B.; Nelson, L. A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes 1. *Soil Science Society of America Journal*. 35(4):658 - 660.
17. De Battista, J. P.; Costa, M. C. 1998. Efecto de la fertilización fosfatada y la frecuencia de defoliación sobre la producción y calidad del trébol rojo. *Revista Argentina de Producción Animal*. 18(supl. 1): 192 - 193.
18. Del Pino, A.; Rodríguez, T.; Andión, J. 2016. Production improvement through phosphorus fertilization and legume introduction in grazed native pastures of Uruguay. *Journal of Agricultural Science*. 154(2):347-358.

19. Dobermann, A.; Fairhurst, T. 2000. Rice: nutrient disorders and nutrient management. Los Baños, Philipines, International Rice Research Institute. 191 p.
20. Dou, Z.; Knowlton, K. F.; Kohn, R. A.; Wu, Z.; Satter, L. D.; Zhang, G.; Toth, J. D.; Ferguson, J. D. 2002. Phosphorus Characteristics of Dairy Feces Affected by Diets. *Journal of Environmental Quality*. 31(6):2058 - 2065.
21. Halliday, D. J.; Trenkel, M. E. 1992. IFA world fertilizer use manual. Paris, International Fertilizer Industry Association. 632 p.
22. Harris, W. 1987. Population dynamics and competition. *In*: Baker, M.; Williams, W. eds. *White Clover*. Wallingford, UK, CABI. pp. 203 - 297.
23. Hart, J.; Pirelli, G.; Cannon, L.; Fransen, S. 1996. Pastures: western Oregon and Western Washington. Oregon, Oregon State University. 4 p.
24. Haynes, R. J.; Williams, P. H. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy*. 49:119-199.
25. Hernández, J.; Otegui, O.; Zamalvide, J. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía. 31 p.
26. _____. 2010. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
27. Høgh-Jensen, H.; Fabricius, V.; Schjoerring, J. K. 2001. Regrowth and nutrient composition of different plant organs in grass-clover canopies as affected by phosphorus and potassium availability. *Annals of Botany*. 88(1):153 - 162.
28. Holford, I.; Morgan, J.; Bradley, J.; Cullis, B. 1985. Yield responsiveness and response curvature as essential criteria for the evaluation and calibration of soil phosphate tests for wheat. *Australian Journal of Soil Research*. 23(2):167 - 180.

29. Kaiser, D.; Lamb, J.; Eliason, R. 2011. Fertilizer guidelines for agronomic crops in minnesota. (en línea). St. Paul, MN, University of Minnesota. 43 p. Consultado ene. 2019. Disponible en <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/198924>
30. Kurz, I.; Coxon, C.; Tunney, H.; Ryan, D. 2005. Effects of grassland management practices and environmental conditions on nutrient concentrations in overland flow. *Journal of Hydrology*. 304:35 - 50.
31. Mallarino, A. 2005. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continua con maíz y soja en el cinturón de maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 8:9 - 15.
32. _____; Sawyer, J.; Barnhart, S. 2013. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. (en línea). Iowa, Ames, Iowa State University. Extension and Outreach Publications. 15 p. Consultado ago. 2018. Disponible en https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1086&context=extension_pubs
33. Mears, P. T.; Cullis, B. R. 1993. Superphosphate maintains soil fertility and beef production on grazed white clover pastures in the subtropics. 2. Liveweight responses of beef cattle. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 33(4):435 - 442.
34. Mendoza, R.; García, I.; Depalma, D.; López, C. 2016. Competition and growth of a grass - legume mixture fertilised with nitrogen and phosphorus: effect on nutrient acquisition, root morphology and symbiosis with soil microorganisms. *Crop and Pasture Science*. 67(6):629 - 640.
35. Nelson, L. A.; Anderson, R. L. 1977. Partitioning of Soil Test - Crop response probability. In: Peck, T. R.; Cope, J. T.; Whitney, D. A. eds. *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 19 - 38.
36. Racca, R.; Pollino, D.; Dardanelli, J.; Basigalup, D.; González, N.; Brenzoni, E.; Hein, N.; Balzarini, M. 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. (en línea). Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. s.p. Consultado may. 2019. Disponible en <https://www.fornatec.com.ar/manuales/pdfs/191-20180215162608-pdfEs.pdf>

37. Ron, M. 2003. Calibración de análisis de suelos: niveles y paradigmas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 17:13 - 17.
38. Rowarth, J. S.; Gillingham, A. G.; Tillman, R. W.; Syers, J. K. 1988. Effects of season and fertiliser rate on phosphorus concentrations in pasture and sheep faeces in hill country. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 31(2):187 - 193.
39. Safley, L. M.; Westerman, P. W.; Barker, J. C. 1986. Fresh dairy manure characteristics and barnlot nutrient losses. *Agricultural Wastes*. 17(3):203 - 215.
40. Schulte, R.; Richards, K.; Daly, K.; Kurz, I.; McDonald, E. J.; Holden, N. M. 2006. Agriculture, meteorology and water quality in Ireland: a regional evaluation of pressures and pathways of nutrient loss to water. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*. 106b(2):117 - 133.
41. _____; Herlihy, M. 2007. Quantifying responses to phosphorus in Irish grasslands: interactions of soil and fertiliser with yield and P concentration. *European Journal of Agronomy*. 26(2):144 - 153.
42. Sinclair, A. G.; Johnstone, P. D.; Smith, L. C.; Risk, W. H.; Morton, J. D.; O'Connor, M. B.; Roberts, A. H. C.; Nguyen, L.; Shannon, P. W. 1994. Patterns of, and a model for, dry matter yield response in grass/clover pastures to annual applications of triple superphosphate fertiliser. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 37(2):239 - 253.
43. Slaton, N. A.; Brye, K. R.; Bacon, R. K.; Mozaffari, M. 2005. Correlation and Calibration of Mehlich-3 Phosphorus Recommendations for Winter Wheat Following Rice in Arkansas. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 36(7-8):993 - 1004.
44. Tisdale, S. L.; Nelson, W. L. 1970. *Fertilidad de los suelos y fertilizantes*. Barcelona, Montaner y Simón. 760 p.
45. UdelaR. FA (Universidad de la República. Facultad de Agronomía, UY). 2010. *Análisis químico de suelos, plantas y aguas*. Montevideo. 114 p.

46. Willoughby, W. M. 1954. Some factors affecting grass-clover relationships. Australian Journal of Agricultural Research. 5(2):157-180.
47. Wu, Z.; Satter, L. D.; Sojo, R. 2000. Milk Production, Reproductive Performance, and Fecal Excretion of Phosphorus by Dairy Cows Fed Three Amounts of Phosphorus. Journal of Dairy Science. 83(5):1028 - 1041.
48. YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales, AR). s.f. Fertilizantes fosforados: superfosfato triple 0-46-0. (en línea). Buenos Aires. 2 p. Consultado jul. 2019. Disponible en <https://www.ypf.com/productosyservicios/Descargas/Superfosfato-triple.pdf>