

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

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

por

Gastón BRACCO
Silvana HERNÁNDEZ

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2018

Tesis aprobada por:

Director:

PhD. Ing. Agr. Carlos H. Perdomo

MSc. Ing. Agr. Marcelo Ferrando

Ing. Agr. José Pedro Zamalvide

Fecha: 22 de junio de 2018

Autores:

Gastón Andrés Bracco Bresciano

Silvana Daniela Hernández Barisone

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.

Al personal del laboratorio de suelos que nos enseñaron y ayudaron en las diferentes tareas durante el trabajo realizado allí.

Al Departamento de Documentación y Biblioteca por la ayuda en la búsqueda de material y en la corrección del documento.

A nuestras familias por toda la ayuda y apoyo brindado.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 INTRODUCCIÓN.....	3
2.2 CONTENIDOS Y FORMAS DE FÓSFORO EN EL SUELO.....	3
2.2.1 <u>Contenido de fósforo de los suelos</u>	3
2.2.2 <u>Formas de fósforo en el suelo</u>	4
2.2.2.1 Fósforo en solución.....	4
2.2.2.2 Fósforo inorgánico.....	5
2.2.2.3 Fósforo orgánico.....	5
2.2.3 <u>Ciclo del fósforo en el suelo</u>	6
2.3 RETENCIÓN DE FÓSFORO POR LOS SUELOS.....	8
2.4 FACTORES QUE DETERMINAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO.....	11
2.5 REACCIONES DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS SOLUBLES EN AGUA EN EL SUELO.....	13
2.6 ANÁLISIS DE SUELO PARA FÓSFORO.....	13
2.7 EQUIVALENTE FERTILIZANTE Y TASA DE DESCENSO ANUAL.....	18
2.8 ANTECEDENTES EDAFOLÓGICOS DE LOS SUELOS.....	19
2.8.1 <u>Unidad Isla Mala</u>	20
2.8.2 <u>Unidad San Gabriel – Guaycurú</u>	21
2.8.3 <u>Unidad San Jacinto</u>	21
2.8.4 <u>Unidad Tala Rodríguez</u>	22

2.9 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DOMINANTES.....	22
2.10 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS.....	23
2.11 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICA (CIC) Y SATURACIÓN DE BASES DE LOS SUELOS (SB).....	26
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	28
3.1 UBICACIÓN DE LOS SITIOS.....	28
3.2 INSTALACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS Y MUESTREO.....	28
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS EN LOS DISTINTOS SITIOS.....	29
3.3.1 <u>Indicadores físicos y químicos para la clasificación de los suelos en los sitios</u>	29
3.4 DETERMINACIÓN DEL P ASIMILABLE EN EL SUELOS POR VARIOS MÉTODOS.....	30
3.4.1 <u>Determinación de P asimilable por el método P Bray I</u>	30
3.4.2 <u>Determinación de P asimilable por el método P Mehlich III</u>	30
3.4.3 <u>Determinación de P asimilable por el método ácido cítrico (0,5%)</u>	31
3.4.4 <u>Determinación de P asimilable por el método P WEP</u>	31
3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	32
3.5.1 <u>Modelo estadístico</u>	32
3.5.2 <u>Análisis estadístico</u>	33
3.6 RESOLUCIÓN DE DERIVADAS EN LAS ECUACIONES DIFERENCIALES.....	33
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	34

4.1 RELACIÓN ENTRE EL VALOR DE P LÁBIL DEL SUELO CON LAS DOSIS DE P APLICADAS Y EN EL MOMENTO DE MUESTREO.....	34
4.2 RELACIONES ENTRE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE P DISPONIBLE.....	45
4.2.1 <u>Estimación de la relación entre métodos con análisis de regresión</u>	45
4.2.2 <u>Estimación de los niveles críticos de P para los métodos P Cítrico, P Mehlich III y P WEP</u>	50
4.2.3 <u>Estimación del coeficiente de extracción para el modelo de índice de P</u>	51
4.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE P PARA RECOMENDACIONES DE FERTILIZACIÓN	52
4.3.1 <u>Equivalente fertilizante</u>	52
4.3.2 <u>Tasa de descenso</u>	59
4.3.3 <u>Ejemplo de cálculo de la dosis de P₂O₅ a agregar</u>	64
5. <u>CONCLUSIONES</u>	73
6. <u>RESUMEN</u>	77
7. <u>SUMMARY</u>	79
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	81
9. <u>ANEXOS</u>	89

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Métodos de análisis utilizados para determinar P extractable en suelos.....	15
2. Caracterización físico - química de los suelos en los sitios donde se instalaron los ensayos.....	24
3. Concentración de bases totales (BT) y proporción de cada catión sobre la suma de los mismos.....	26
4. Fecha de instalación, cobertura de los ensayos y detalle del muestreo.....	29
5. Concentraciones promedio de P lábil (ppm) y parámetros estadísticos (%) según distintos métodos de análisis para los diferentes sitios, según dosis de P_2O_5 ha ⁻¹ aplicada.	34
6. Concentraciones promedio de P lábil (ppm) y parámetros estadísticos (%) según distintos métodos de análisis para los diferentes sitios, según dosis de P_2O_5 ha-1 aplicada	41
7. Estimación de P Bray I a partir de los datos observados y las ecuaciones determinadas en las relaciones de P disponible entre los métodos.....	47
8. Estimación de NC de P (ppm), a partir de datos conocidos en P Bray I, para algunas especies de interés agronómico y el umbral ambiental.....	50
9. Estimación del EF a partir de función lineal y exponencial.....	55
10. Equivalente fertilizante (EF) estimado a partir de la función lineal, exponencial y R^2 para cada sitio y en los 4 métodos evaluados, considerando los días desde la fertilización.....	57
11. Valores de tasa de descenso en los sitios Candil y Tossi para las dosis de 40, 80 y 120 kg de P_2O_5 ha. ⁻¹	63
12. Fórmulas de estimación de dosis óptima. Se incluye el procedimiento de despeje para su estimación.....	65
13. Dosis óptimas estimadas para los modelos lineal y exponencial en base a los valores de P lábil determinados por 4 métodos.....	68
14. Valores de dosis óptima estimada para cada sitio y métodos de determinación de P asimilable.....	71

Figura No.

1. Ciclo del fósforo en el sistema suelo-planta.....	7
2. Unidades de suelo correspondiente a cada sitio de estudio.....	20
3. Ubicación de los sitios en el país.....	28
4. Resultados promedios de P lábil (ppm) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P ₂ O ₅ há ⁻¹) para la profundidad de 0-7,5cm.....	37
5. Diferencias relativas entre métodos (%) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P ₂ O ₅ há ⁻¹) para la profundidad de 0-7,5cm.....	37
6. Resultados promedios de P lábil (ppm) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P ₂ O ₅ há ⁻¹) para la profundidad de 7,5-15 cm.....	43
7. Diferencias relativas entre métodos (%) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P ₂ O ₅ há ⁻¹) para la profundidad de 7,5-15 cm.....	43
8. Relación entre el método de estimación de P Mehlich III y P Bray I para la profundidad de 0-7,5 cm.....	45
9. Relación entre el método de estimación de P Cítrico y P Bray I para la profundidad de 0-7,5 cm.....	45
10. Relación entre el método de estimación de P WEP y P Bray I para la profundidad de 0-7,5 cm.....	46
11. Relación entre el método de estimación de P Mehlich III y P Bray I para la profundidad de 7,5-15 cm.....	49
12. Relación entre el método de estimación de P Cítrico y P Bray I para la profundidad de 7,5-15 cm.....	49
13. Evaluación de la respuesta del P asimilable al agregado de P ₂ O ₅ para los métodos P Mehlich III, P Bray I, P Cítrico y P WEP (28-05-14).....	53
14. Evaluación de la respuesta del P asimilable al agregado de P ₂ O ₅ para los métodos P Mehlich III, P Bray I, P Cítrico y P WEP (23-10-14).....	54
15. Representación gráfica del equivalente fertilizante para la función exponencial en el sitio Tossi, dosis 80 kg ha. ⁻¹ en la fecha 28-05-14.....	56
16. Tasa de descenso para el sitio Candil.....	60
17. Tasa de descenso para el sitio Tossi.....	61
18. Dosis de P ₂ O ₅ a agregar para llegar al NC comparando modelos de cálculo que utilizan un equivalente fertilizante lineal y otro exponencial en el sitio Candil (28-05-14).....	66

19. Dosis de P_2O_5 a agregar para llegar al NC comparando modelos de cálculo que utilizan un equivalente fertilizante lineal y otro exponencial en el sitio Candil (23-10-14).....	66
---	----

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realizó entre marzo del 2014 y diciembre del 2017 dentro de un proyecto del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) titulado “Relaciones entre nivel de P lábil del suelo y calidad del agua de escurrimiento: modelo georeferenciado para la cuenca de Paso Severino”.

La problemática de la contaminación de aguas superficiales con fósforo (P) detectada en la cuenca del río Santa Lucía (superficie de 13310 km²) es preocupante debido a que esta cuenca abastece con agua entorno al 60% de la población del país.

Al incrementarse los niveles de P en el agua, pueden producirse eventos de crecimiento excesivo de cianobacterias y algas, las cuales pueden causar tanto cambios de olor y sabor en agua como también problemas serios de salud en la población y ganado, ya que algunas especies (ejemplo: *Microcystis aeruginosa*) producen sustancias químicas con efectos neurotóxicos y hepatotóxicos. Eventualmente, este aumento de P en el agua puede incrementar la población de plantas acuáticas y disminuir los niveles de oxígeno, provocando la muerte de peces y reduciendo la calidad de las aguas para esparcimiento.

Las fuentes por las cuales el P llegaría al agua pueden ser tanto puntuales como difusas. Las fuentes puntuales estarían compuestas por los efluentes de industrias, ciudades o tambos, entre otras. Estas fuentes pueden ser identificadas y controladas más fácilmente (Sharpley et al., 1995). En cambio, las fuentes difusas se originan de áreas agrícolas o ganaderas a través del aporte de nutrientes que se encuentran tanto en las partículas del suelo que vienen con la erosión o del P disuelto en el agua de escurrimiento. Obviamente, resulta más complejo disminuir el aporte proveniente de estas fuentes.

Las fuentes de agua de la cuenca del río Santa Lucía se localizan en zonas donde existe actividad industrial, centros urbanos y establecimientos agropecuarios intensivos como “feedlots”, tambos, etc., que descargan cantidades importantes de nutrientes al agua (MVOTMA, 2013). Por lo tanto, es altamente probable la ocurrencia de problemas de contaminación de aguas con nutrientes en el área.

En base a la problemática detectada es que este proyecto (incluido el aporte de los datos de esta tesis) pretende establecer un modelo de Índice de P, el cual puede ser utilizado para cuantificar los efectos del uso del suelo en la

exportación de este nutriente y su efecto en la calidad de aguas y ayudar a prever los impactos de futuros cambios.

Con este modelo, se pueden establecer además umbrales para regular la fertilización fosfatada basada en un enfoque ambiental y no únicamente agronómico.

El objetivo general es revisar el modelo de fertilización fosfatada y extenderlo para que considere métodos más recientes de estimación de P lábil.

Los objetivos específicos son:

a) Evaluar la relación mediante análisis de regresión, entre los métodos de determinación de P lábil en el suelo (P Bray I, P Cítrico, P Mehlich III y P WEP), de forma de determinar el nivel de asociación entre ellos y establecer ecuaciones que permitan transformar los valores de un método en otro para el rango de los suelos estudiados.

b) Determinar la variación en el tiempo de los contenidos de P disponible en el suelo extraído por distintos métodos de análisis frente al agregado de diferentes dosis de fertilizante fosfatado soluble, y estimar funciones para calcular las tasas de descenso y el equivalente fertilizante a distintos momentos para cada sitio y tratamiento.

c) Evaluar la posibilidad de utilizar el método P WEP no solo como indicador ambiental, sino como indicador agronómico.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) se define como un macro nutriente primario junto al nitrógeno (N) y el potasio (K), basándose en las posibilidades de que éstos sean deficitarios para las plantas. Los compuestos fosfatados del suelo son muy estables debido a su baja solubilidad, razón por la cual representa la causa inmediata de deficiencia en las plantas. Además, esta característica, ocasiona que no se registren fácilmente pérdidas por volatilización y lixiviación como ocurre con el N.

2.2 CONTENIDOS Y FORMAS DE FÓSFORO EN EL SUELO

2.2.1 Contenido de fósforo de los suelos

Según Hernández et al. (1995), para diferentes suelos de Uruguay, el rango de P total registrado oscila entre 0,013 y 0.089%, lo que representa 126 y 887 ppm, respectivamente ($1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg Kg}^{-1}$), con un promedio de 0,032% (321 ppm). Las variaciones se explican por el material de origen de los suelos y las condiciones de meteorización.

Tomando en cuenta el material de origen de los suelos, los valores más bajos de P total son los derivados de la alteración de rocas ácidas de basamento cristalino y sedimentos de textura gruesa. Por otra parte, los valores más altos se registran en suelos originados a partir de la alteración de rocas básicas. En un rango intermedio se encuentran los suelos derivados del sedimento limo arcilloso. En cuanto al grado de meteorización, los suelos altamente meteorizados cuentan con bajo contenido de P.

Según García et al. (2014), *“los contenidos de P total dependen de la naturaleza del material madre, del grado de meteorización, de la ocurrencia de lavado, y de los efectos antrópicos de extracción por cosechas y aplicación de abonos y fertilizantes. Los suelos bajo cultivo pierden P a través de la remoción en los productos de cosecha (granos, frutos, fibras, forrajes) y, eventualmente, por erosión”*.

“El contenido de P total es usualmente similar en horizontes superficiales y sub-superficiales bajo condiciones prístinas (Stevenson y Cole, citados por García et al. 2014). Sin embargo, la adsorción del P aplicado como

abono o fertilizante por la fracción inorgánica del suelo, la acumulación de residuos de cosecha en superficie y la baja movilidad del P en profundidad resultan en una mayor concentración de este nutriente en superficie en suelos bajo cultivo, especialmente en sistemas de siembra directa.” (Scheiner y Lavado, Sharpley, citados por García et al., 2014).

Desde un punto de vista agronómico, las plantas absorben el P de la fracción soluble, la que a su vez es reabastecida por una fracción lábil orgánica e inorgánica que está en equilibrio con fracciones moderadamente lábiles y de muy baja labilidad. Dada la baja concentración de P soluble, es muy importante el abastecimiento de este nutriente desde la fracción lábil para garantizar un adecuado suministro a las plantas. Los extractantes que se utilizan para los análisis de suelo procuran cuantificar esta fracción lábil y la fracción soluble. Dado que las plantas solo absorben el P de la fracción soluble del suelo, el contenido de P total no es un buen indicador de P disponible para las plantas.

Uno de los métodos utilizados para estimar el P asimilable o disponible para las plantas, es P Bray I. Según Hernández et al. (1995), para suelos de Uruguay sin fertilización fosfatada previa en diferentes materiales de origen, los valores registrados son: lavas basálticas (formación Arapey) 3,6 ppm de P, limos terciarios (formación Fray Bentos) 5,2 ppm de P, predevoniano (granitos y migmatitas) 2,2 ppm de P y areniscas triásicas y cretácicas 3,2 ppm de P. Estos valores son notoriamente más bajos que los de P total, indicando que no todo el P está disponible para las plantas.

2.2.2 Formas de fósforo en el suelo

Según Hernández (2010), se puede encontrar el P integrando tres fracciones: el P en la solución del suelo, P bajo forma de compuestos inorgánicos y P en materiales orgánicos y humus del suelo.

2.2.2.1 Fósforo en solución

El P en la solución del suelo se presenta bajo formas iónicas derivadas del ácido fosfórico. Dependiendo del pH de la solución es la forma que predomina. En medio ácido la forma más encontrada es H_2PO_4^- y en pH superiores a 7,2 es HPO_4^{2-} . El H_2PO_4^- es absorbido generalmente con mayor velocidad por las plantas.

En condiciones de campo natural sin fertilización, Hernández (2010) plantea que no se deben esperar valores mayores a 0,05 ppm, en tanto que en suelos con fertilizaciones medias puede llegar a rangos de entre 0,1 a 0,2 ppm.

2.2.2.2 Fósforo inorgánico

Según Hernández (2010), dentro del fósforo inorgánico se distinguen dos fracciones, el fósforo lábil y no lábil. La primera representa aquella fracción del P del suelo que responde rápidamente a un descenso en la concentración de P en la solución del suelo, tendiendo a reponer ese P a la solución hasta un nivel que sería correspondiente a la constante del producto de solubilidad de los compuestos que lo forman. La segunda fracción, también conocida como P fijado está referida a aquellos compuestos fosfatados de muy alta estabilidad y cristalinidad, lo que determina una baja reactividad química. Por lo tanto, su importancia desde el punto de vista de la nutrición inmediata de las plantas es prácticamente nula.

El límite entre la fracción lábil y no lábil es difuso, ya que los compuestos fosfatados son muy diversos y de valores de constante de solubilidad muy variables. Sus proporciones dentro del suelo también varían y están estrechamente relacionadas con la cantidad, forma y frecuencia de las fertilizaciones fosfatadas.

El P de la fracción inorgánica del suelo se encuentra formando parte de compuestos muy diversos bajo formas de fosfatos de hierro (P-Fe), aluminio (P-Al) y calcio (P-Ca). Los P-Fe y P-Al se encuentran comúnmente en los suelos ácidos mientras que los P-Ca predominan en suelos calcáreos.

El contenido de P inorgánico total en los suelos del Uruguay oscila entre 43 y 458 ppm con un valor promedio de 155 ppm según el estudio realizado por Hernández et al. (1995) sobre 31 suelos con campo natural del Uruguay en los primeros 15 cm de profundidad.

2.2.2.3 Fósforo orgánico

Del P total de los suelos, el 50% se le atribuye al P orgánico, aunque puede variar entre 18 y 80%. En nuestro país los valores encontrados por Hernández et al. (1995) varían entre 65 y 429 ppm. La mayoría de los compuestos de P orgánico son ésteres del ácido ortofosfórico (H_2PO_4^-), y han

sido identificados principalmente como fosfatos de inositol, fosfolípidos y ácidos nucleicos.

Dentro del P orgánico, Hernández et al. (1995), plantean que es posible diferenciar tres fracciones:

- humus del suelo. El P integra compuestos muy variados, en su mayoría de composición desconocida y estabilidad heterogénea. Dado esto, es que se los agrupa en fracción lábil y no lábil. Para suelos de Uruguay el contenido de P en la materia orgánica oscila entre 0,3 y 0,4%.

- restos frescos de cultivos no humificados y excreciones de origen animal. Se trata de compuestos menos variables que los correspondientes al humus. Su contenido puede variar en el orden de 0,1 a 0,2% de P en la materia seca.

- biomasa microbiana del suelo. Integra parte de las estructuras de los microorganismos, siendo esta la fracción más dinámica. Se han encontrado valores q oscilan entre 1 y 4% de P en la materia seca de los microorganismos.

2.2.3 Ciclo del fósforo en el suelo

Del contenido total de P en el suelo, solo las fracciones inorgánicas y orgánicas solubles y lábiles están disponibles para las plantas durante el ciclo del cultivo. Las fracciones de P indicadas en la Figura 1 mantienen un equilibrio dinámico y complejo (Stewart y Sharpley, 1987). Solamente una pequeña fracción del P está en forma soluble, pero esta fracción está en equilibrio con la fracción lábil que comprende el P orgánico fácilmente mineralizable, los fosfatos débilmente adsorbidos a las arcillas y las formas minerales de baja KPS (constante del producto de solubilidad). La mayor parte del P del suelo está en formas insolubles como P-Ca, P-Fe y P-Al, fosfatos retenidos en el humus o fijados fuertemente en las arcillas (García y Picone, s.f.).

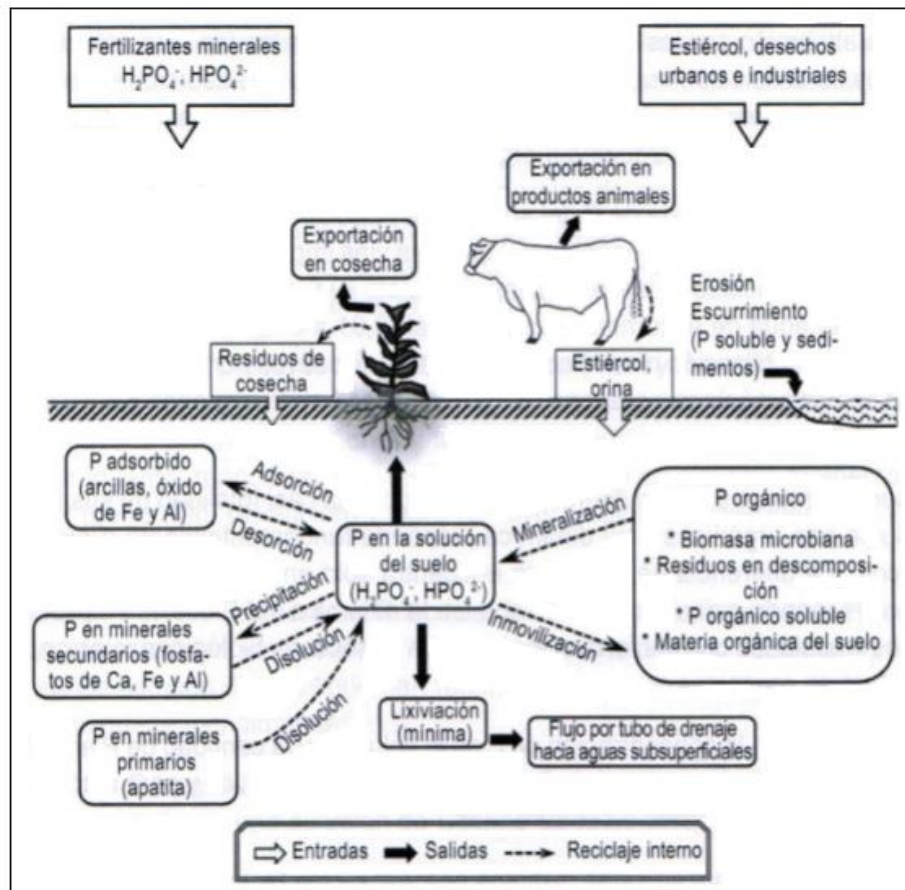


Figura 1. Ciclo del fósforo en un suelo bajo cultivo.

Fuente: Rabuffeti (2017)

Stewart y Sharpey (1987), describen el ciclo del fósforo como un sistema en equilibrio dinámico con intercambios gobernados por reacciones químicas, físicas y biológicas. Representan a la actividad microbiana como una rueda que gira en el suelo en respuesta a las entradas de energía bajo la forma de carbono (C) y que tiene un papel central en las transformaciones del P. Si la rueda se enlentece o se detiene por falta de energía o por esterilización parcial del suelo, el suministro de P a las plantas se limitará a la cantidad de P inorgánico lábil existente en el suelo. Por el contrario, si el suministro de C no se detiene, las plantas contarán con mayor cantidad de P en solución, dado que éste está siendo repuesto desde formas inorgánicas y orgánicas lábiles.

Las plantas absorben el P desde la solución del suelo, la que a su vez es reabastecida por una fracción lábil de naturaleza orgánica e inorgánica. Esta

fracción de P lábil está en equilibrio con fracciones moderadamente lábiles y de muy baja labilidad.

Según Ciampitti (2009), dada la baja concentración de P soluble, el abastecimiento de P desde la fracción lábil es de extrema importancia para garantizar un adecuado suministro de P a las plantas.

Un aspecto de gran importancia son las posibles entradas y salidas de P en el sistema (Figura 1). Dentro de las entradas, se establecen las fertilizaciones fosfatadas (solubles e insolubles), abonos orgánicos, excreciones animales y residuos vegetales. Por su parte, las salidas se pueden enumerar en exportación por venta de los animales, con la cosecha del producto agrícola y erosión. De la diferencia entre las entradas y salidas al sistema, se establece el balance de masa de P. En los agrosistemas, este balance se considera para la capa de suelo explorada por las raíces en períodos anuales.

2.3 RETENCIÓN DE FÓSFORO POR LOS SUELOS

Según Hernández (2010), *“Cuando se agrega un fertilizante fosfatado soluble en agua al suelo se observa rápidamente una desaparición del mismo de la solución del suelo. Este fenómeno es conocido como retención, adsorción o fijación de P por parte de la solución del suelo. Las causas de la desaparición del P de la solución, es la reacción con cationes como Al^{+3} , Fe^{+3} o Ca^{+2} , o superficies de alta reactividad química, formando productos de muy baja solubilidad”*.

En suelos ácidos, los mecanismos de retención que predominan son:

- precipitación con Al^{+3} y posiblemente Fe^{+3} en la solución del suelo. Tisdale et al. (1993), establecen que el alto grado de retención de P en los suelos ácidos está asociado con la presencia de altos contenidos de Al intercambiable y que tanto el Al^{+3} en solución, como los compuestos productos de su hidrólisis (polímeros), pueden retener al P.

- adsorción. El P reacciona con cationes de alta reactividad química que se encuentran en la superficie de las fracciones finas del suelo. En general, a medida que aumenta el contenido de arcilla se incrementa la capacidad del suelo para retener P por adsorción, debido a la mayor cantidad de posiciones con cationes capaces de retener P en la superficie de los coloides. Los compuestos de la fracción arcilla que actúan con una alta capacidad de retener al P son las arcillas aluminosilicatadas y los óxidos e hidróxidos de Fe.

Por otra parte, en los suelos calcáreos, si bien se registran los mecanismos anteriores, estos ocurren con menor intensidad y además actúan otros tipos de reacciones como:

- precipitación como CaHPO_4 . El alto pH y la gran actividad del Ca en los suelos alcalinos o calcáreos conducen a una rápida formación de fosfatos de Ca. A concentraciones altas de P, es el proceso predominante.

- adsorción sobre carbonato de calcio (CaCO_3). El ortofosfato de los fertilizantes fosfatados solubles puede neutralizarse y quedar adsorbido sobre las partículas de CaCO_3 , a través de reemplazo con el CO_3^{2-} . A bajas concentraciones de P, es el proceso que predomina.

- adsorción sobre partículas de arcilla. En estos suelos, las arcillas tienen en general alta saturación en Ca, por lo cual el H_2PO_4^- puede unirse a ellas a través de puentes de Ca.

Como menciona Hernández (2010), la retención de P es realizada con una mayor energía en suelos ácidos que en suelos calcáreos. A su vez, en ambos tipos de suelo, lo primero que ocurre es la desaparición del P agregado de la solución del suelo, formando productos metaestables de alta reactividad química permaneciendo como productos dentro de la fracción de P lábil. Con el transcurso del tiempo estos productos evolucionan a formas más estables, mejor cristalinizadas, de menor reactividad química y que desaparecen de la fracción de P lábil de los suelos.

A nivel de la retención de P en el corto plazo, Hernández (2010), establece que todos los suelos tienen el equilibrio entre el P adsorbido y el P en solución desplazado hacia la fase sólida, aunque esto varía según el tipo de suelo. Además, señala que una de las metodologías utilizadas para caracterizar la relación entre el P en fase sólida y el P en solución, es la técnica de las isothermas de retención o adsorción de P. A través de estas se puede estimar cuánto P es necesario agregar a los suelos para que luego de las reacciones de corto plazo que ocurren en él se mantenga un cierto nivel de P en la solución. Es a partir de las isothermas, que se pueden definir índices de retención de P, por ejemplo, la cantidad de P retenido en la fase sólida del suelo necesario para mantener un cierto nivel de P en la solución del suelo o qué porcentaje del P agregado a una muestra de suelo es retenido por ella. La unidad en la que se expresan estos índices de retención es la cantidad de P retenido en la fase sólida que se necesita para mantener 1 mg P L^{-1} en solución y que para los 39

suelos del trabajo de Escudero y Morón, citados por Hernández (2010), reportan valores que oscilan entre 19 y 248 ppm de P.

En Uruguay, según datos de Escudero y Morón, Hernández y Zamalvide, citados por Hernández (2010), categorizaron los suelos desde el punto de vista de la retención de P. Los factores más importantes que describen en el proceso son el material de origen y las condiciones de formación del suelo.

Dentro de los suelos de la categoría de baja retención de P, índice de retención entre 0 – 60, se encuentra los de las unidades de suelo Algorta, Cuchilla Corralito, Cañada Nieto, Chapicuy, Las Toscas, Trinidad, Fray Bentos, Colonia Palma, Libertad, San Luís, Lascano y Río Branco. Estos suelos normalmente tienen medios a bajos contenidos de arcillas y/o óxidos de Fe, siendo los minerales dominantes de tipo 2:1. Por lo general, no contienen Al intercambiable.

En la categoría de alta retención de P, índice de retención >120, se encuentran los suelos derivados o con influencia de materiales del Basamento Cristalino, Basalto, formación Melo y devoniano. Los suelos derivados de Basalto presentan altos contenidos de óxidos de Fe y arcilla, en tanto que los suelos de Basamento Cristalino presentan altos contenidos de óxido de Fe, pero su contenido de arcilla no es elevado. En los materiales del devoniano, la presencia de minerales del tipo 1:1 en la fracción arcilla, explicaría su alto grado de retención, además de la presencia de Al intercambiable.

De lo expuesto anteriormente, se concluye que, para los suelos con alta capacidad de retención, es necesario agregar más P para elevar los niveles de P lábil y que los niveles de suficiencia alcanzados por la fertilización van disminuyendo más rápidamente en el tiempo. Como ejemplo, según las isotermas realizadas por Hernández y Zamalvide, citados por Hernández (2010), encontraron que para mantener una cierta concentración de P en solución son necesarias cantidades diferentes de P en la fase sólida según los diferentes suelos. Un Luvisol de Sierra de Polanco necesita cerca de 400 ppm de P retenido para mantener 10 ppm de P en solución, en cambio, un Brunosol de Toledo necesita poco menos de 200 ppm de P retenido para mantener la misma cantidad de P en solución. En el Luvisol, un alto porcentaje del P agregado al suelo fue retenido por la fase sólida, siendo necesario agregar grandes cantidades para mantener determinados niveles en solución. Las diferencias en las capacidades de retención de P pueden explicar en gran medida la distinta eficiencia de una misma dosis de fertilizante agregado a distintos suelos a corto plazo.

Los estudios mediante la técnica de isotermas caracterizan la eficiencia inicial de un fertilizante agregado, no teniendo valor para predecir la evolución lenta que ocurre a los fosfatos del suelo luego de su retención.

Según como plantea Hernández (2010), luego del agregado del fertilizante fosfatado al suelo, hay un efecto de suministro de P que persiste durante más de un ciclo de crecimiento. A esto se le conoce como efecto residual y resulta de la permanencia del P en los compuestos fosfatados metaestables que integran el P lábil. La retención del P se cumple en dos etapas: una de reacciones rápidas en las que el P es fundamentalmente adsorbido superficialmente y otras de pasos lentos en los que el P se va transformando en compuestos precipitados cristalinos, estables menos reactivos y muy poco disponibles para las plantas.

2.4 FACTORES QUE DETERMINAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO

Según Ciampitti (2009), los principales factores que afectan la disponibilidad de P para los cultivos y la respuesta a la fertilización fosfatada pueden dividirse entre características del suelo (aspectos físicos, químicos y biológicos) y de la planta.

A) Del suelo.

1. Físicos: textura, aireación, compactación, temperatura, humedad.

En el caso de la textura, Sanyal y De Datta, citados por Ciampitti (2009), establecen que los suelos de texturas más finas tienen mayor capacidad de reposición de P que los suelos de textura más gruesa. Sin embargo, la retención de P por adsorción se relaciona positivamente con la presencia de partículas finas de arcilla. Los suelos más pesados requieren una mayor cantidad de P para incrementar el nivel de P extractable. Por otra parte, las características de retención de P dependen del tipo de arcilla, las arcillas de tipo 1:1 como la caolinita presentan una mayor capacidad de retención que las arcillas tipo 2:1. La presencia de óxidos de Fe y Al y formas de Ca también incrementan la capacidad de retención de P de los suelos.

Aireación y compactación: en los suelos con falta de oxígeno o compactados, el menor crecimiento de las raíces afecta la absorción y la difusión de P en el suelo.

Temperatura y humedad: la difusión y absorción de P también son afectadas por bajas temperaturas. Estos efectos son evidentes en siembras tempranas de cultivos de verano y en suelos bajo siembra directa donde la capa de residuos en superficie reduce la temperatura del suelo. Contenidos bajos de agua del suelo afectan la difusión y absorción del P en solución.

2. Químicos: mineralogía, pH, materia orgánica, capacidad de adsorción, interacción con otros nutrientes.

Materia orgánica: la materia orgánica, además de proveer P vía mineralización del P orgánico, provee sitios de baja energía de adsorción contribuyendo a la fracción lábil.

En el caso del pH del suelo, Sharpley, citado por Ciampitti (2009), lo ha indicado como el factor más importante en la regulación del P disponible. En general, se considera que la disponibilidad de P es óptima a pH de 6-7.

Interacciones con otros nutrientes: las interacciones de P con otros nutrientes pueden ser de naturaleza antagónica como el caso de zinc (Zn) o positivas como con N, S, K, y otros nutrientes. Disponibilidades de P de suelos altos resultan en deficiencias de Zn para los cultivos. Por otra parte, deficiencias de nutrientes como por ejemplo N o S, limitan la respuesta a P.

3. Biológicos: residuos, raíces, bacterias, micorrizas.

Presencia de residuos, raíces y actividad biológica: la presencia de residuos y raíces incrementa la actividad biológica del suelo y puede resultar en la inmovilización del P disponible. Este proceso de inmovilización tiene su contraparte en la mineralización del P orgánico que aporta P para los cultivos.

B) De la planta. Desarrollo y distribución de raíces, especie, híbrido o variedad, nivel de rendimiento.

Efectos del cultivo: se relacionan con el desarrollo y distribución de raíces, las diferencias entre especies y variedades en lo que hace a requerimientos de P, capacidad de adsorción de P del suelo, y el nivel de rendimiento que afecta la cantidad total de P absorbido.

2.5 REACCIONES DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS SOLUBLES EN AGUA EN EL SUELO

Según Hernández (2010), *“los fertilizantes fosfatados solubles son aquellos materiales fertilizantes donde se ha aumentado la solubilidad del P a través de un tratamiento ácido o térmico. El material resultante presenta la característica general de presentar un contenido muy elevado de P soluble al agua y citrato de amonio 1N”*.

Cuando se agrega un fertilizante soluble al suelo, ocurren dos procesos simultáneamente, la disolución del fertilizante y reacciones de la solución con el suelo. En el primero de ellos, la primera reacción que ocurre es el humedecimiento y disolución de los gránulos del fertilizante. Luego de esto, se forma una solución muy ácida y altamente concentrada de P y Ca, lo que ocasiona un gradiente osmótico que favorece que el agua siga moviéndose hacia donde se encuentra el gránulo de fertilizante. Al mismo tiempo que la solución saturada se desplaza hacia el suelo circundante, se produce la precipitación de compuestos fosfatados de calcio. En general, se estima que aproximadamente, el 20% del P aplicado queda de esta manera en el sitio de aplicación y el resto del P se mueve con la solución. Las reacciones antes mencionadas, están determinadas por las propiedades del fertilizante (% de P soluble en agua, acidez residual, cationes acompañantes) humedad y temperatura del suelo, en cambio la influencia de las características químicas y mineralógicas del suelo son pocas o nulas.

Por su parte, en las reacciones de la solución del suelo, sucede que el avance de la solución ácida y concentrada en Ca y P, genera inicialmente una acidificación temporal del suelo circundante y la liberación de cationes de Fe, Al, manganeso (Mn), Ca y otros cationes.

El efecto en el pH de la zona afectada es temporal y restringido a unos pocos milímetros (mm) alrededor del grano (no más de 3 cm en aplicaciones en banda). El pH original se re establece al cabo de pocas semanas.

2.6 ANÁLISIS DE SUELO PARA FÓSFORO

Con el objetivo de disponer de índices que permitan evaluar la disponibilidad de P de los suelos para las plantas (P asimilable) se han desarrollado diferentes métodos analíticos.

En el mundo existen muchos métodos para determinar las diversas formas de fósforo en el suelo que podrían separarse en los que hacen una extracción química (P Bray I, Olsen, P Mehlich III, P Cítrico, entre otros) de los que actúan reteniendo aniones y cationes de la solución y de superficie de partículas de suelo (métodos de resinas de intercambio, Cuadro 1).

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 (Hernández, 2010).

A partir de los resultados obtenidos en los posibles análisis de P en el suelo y en función de los requerimientos del cultivo que se llevará adelante, y otros aspectos del manejo, es que se ajustan las recomendaciones de dosis de fertilizante. Sin desmedro de lo anterior, Stewart y Sharpley (1987), afirman que los métodos de análisis de P disponible presentan la desventaja de que solo miden las formas inorgánicas, sin tener en cuenta la contribución de las formas orgánicas mineralizables (subestimando el contenido de P disponible en la fracción lábil) y la historia de manejo previo.

Kamprath y Watson, citados por Ciampetti (2009) determinaron que los extractantes utilizados por los diversos métodos se basan en distintos procesos (disolución ácida, intercambio aniónico, formación de complejos con cationes, o hidrólisis catiónica) y determinan P de más de una fracción del P inorgánico, aunque algunos métodos remuevan mayoritariamente alguna fracción específica como, por ejemplo, el P Bray I en las fracciones de P ligadas al Al.

Propiedades del suelo tales como el pH, tipo y clase de arcilla, temperatura, compactación, humedad, y aireación, así como también de los cultivos, el sistema de manejo y factores económicos pueden limitar el alcance de los análisis e interpretación de los resultados.

El diagnóstico de la fertilización fosfatada está basado en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial utilizando un extractante que sea apto para los suelos del área en evaluación.

Por su parte, Zamuner et al., citados por Erro et al. (2012), establecen que la profundidad de muestreo está determinada por el nutriente o propiedad del suelo que se pretende cuantificar. Para P se ha recomendado la

profundidad de 0-20 cm. Las profundidades de 0-5 cm y 20-40 cm no mejoran la correlación con el crecimiento y la respuesta a la fertilización.

Cuadro 1. Métodos de análisis utilizados para determinar P extractable en suelos.

Análisis	Composición del extractante	Referencia
AB-DTPA	1 M NH_4HCO_3 + 0,005 M DTPA – pH 7,5	Soltanpour y Schwab (1977)
P Bray I	0,03 M NH_4F + 0,025 M HCl	Bray y Kurtz (1945)
P Bray II	0,03 M NH_4F + 0,1 M HCl	Bray y Kurtz (1945)
Ácido Cítrico	Ácido Cítrico 1%	Dyer (1894)
Ácido Cítrico	Ácido Cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) al 0,5%	Desarrollado en el INIA, La Estanduela por el Dr. Morón, A. ¹
Egner	0,01 M Ca lactate + 0,02 M HCl	Egner et al. (1960)
ISFEIP (Hunter)	0,25 M NaHCO_3 + 0,01 M NH_4F + 0,01 M EDTA - pH 8,5	ISFEIP (1972)
Mehlich I ¹	0,05 M HCl + 0,0125 M H_2SO_4	Mehlich (1953)
Mehlich II	0,015 M NH_4F + 0,2 M CH_3COOH + 0,2 M NH_4Cl + 0,012 M HCl	Mehlich (1978b)
Mehlich III	0,015 M NH_4F + 0,2 M CH_3COOH + 0,25 M NH_4NO_3 + 0,013 M HNO_3 + EDTA	Mehlich (1984)

¹ Beretta, A. 2017. Com. personal.

Morgan	0,54 M CH_3COOH + 0,7 M $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ – pH 4,8	Morgan (1941)
Olsen	0,5 M NaHCO_3 - pH 8,5	Olsen et al. (1954)
Truog	0,001 M H_2SO_4 + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - pH 3	Truog (1930)
WEP	Agua desionizada	Kleinman et al., citados por Wolf et al. (2009)

*Adaptado de Fixen y Grove (1990)

¹= Doble ácido. Carolina del Norte.

Según Hernández (2010), en Uruguay, el método P Bray I es el más utilizado para evaluar el P disponible. Este método se adapta a la mayoría de los suelos del país, aunque presenta algunas limitantes para evaluar correctamente la disponibilidad de P en suelos desarrollados de materiales con influencia de basalto o suelos extremos (fuertemente ácidos o con CaCO_3). Además, en el caso de grandes aplicaciones de fertilizantes fosfatados insolubles del tipo fosforitas para uso directo, P Bray I, no evalúa adecuadamente el efecto residual de esos fertilizantes. Por otra parte, este método se basa en el uso de una solución extractiva compuesta de NH_4F 0,03 M y HCl 0,025 M, donde el F del NH_4F compleja al Fe y Al de los compuestos fosfatados de tipo P-Fe y P-Al, mientras que el HCl disuelve los P-Ca, determinando como consecuencia la solubilización del P de compuestos metaestables con estos cationes. Este método fue desarrollado para evaluar el P asimilable de suelos débilmente ácidos.

El método P Mehlich III, fue desarrollado por Mehlich (1984), para mejorar las estimaciones realizadas por su antecesor, el método P Mehlich I (en el cual la solución extractiva era una mezcla de HCl y H_2SO_4 diluidos). La solución extractiva de P Mehlich III está compuesta de una serie de reactivos (NH_4F , CH_3COOH , NH_4NO_3 , HNO_3 , EDTA) con lo cual, además de extraer P, cumple con el objetivo de extraer otros nutrientes de interés (multinutriente para un rango amplio de suelos), como los cationes del complejo de intercambio y micronutrientes. Además, correlaciona con Bray I, Mehlich I y Olsen.

El análisis de P Cítrico al 0,5% utilizado por INIA, fue una modificación propuesta por el Dr. Alejandro Morón en el laboratorio de dicha institución (sin publicar) y tiene como base, la técnica original del Ácido Cítrico al 1% descripta por Dyer (1894).

Se realiza una extracción ácida (por el aporte de H^+) donde se extrae el P adsorbido a los cationes Fe, Al y Ca. Durante el proceso de extracción el citrato quelatiza los cationes en solución evitando la reprecipitación de los iones fosfatos con éstos. Este método es más eficiente en extraer el P ligado al Ca que el método P Bray I, ya que el citrato es más eficiente en evitar la reprecipitación de los iones fosfato con Ca durante la extracción. Por este motivo es más sensible en determinar variaciones de P extractable en suelo, causadas por fertilizaciones con fuentes de P ligadas al Ca.

Según Kleinman et al., citados por Wolf et al. (2009) el método de fósforo extraíble en agua (WEP) determina la concentración de P en la solución del suelo (formas disueltas o fácilmente solubles) utilizando como extractante agua destilada. Según el objetivo que se desea alcanzar, con este método se podría determinar el P en solución (indicador ambiental) o el P disponible para las plantas (indicador agronómico). De esta forma, al implementarlo como indicador ambiental se utiliza el valor de forma directa, en cambio, para usarlo como indicador agronómico, se multiplicó por 100 para hacerlo “comparable” con los demás métodos de estimación de P disponible para las plantas.

Los primeros intereses en el examen del P del suelo se basaron principalmente en la determinación de la cantidad de P suplementaria necesaria para satisfacer adecuadamente las necesidades de los cultivos. El método P WEP y las necesidades de P de las plantas, se examinó en un documento de Luscombe et al., citados por Wolf et al. (2009), donde encontraron una buena correlación entre la concentración de P extraíble en agua y la respuesta de rendimiento de materia seca en el centeno (el alcance de la respuesta vegetal a nutrientes como el P excede los objetivos de este trabajo, se menciona únicamente a modo de introducción al tema y contextualizar el origen del método).

Kleinman et al., citados por Wolf et al. (2009), realizan una crítica en la implementación de métodos como P Mehlich III y P Bray I comparados con P WEP, debido a que los extractantes utilizados son más ácidos o alcalinos que la solución del suelo y de esta forma una parte de P extraída es en realidad de baja disponibilidad. Por ejemplo, se esperaría que los extractantes de P Mehlich III, que contienen ácidos fuertes, disuelvan fosfatos de calcio. Además, debido a la naturaleza química específica de muchos extractantes, su uso se limita a tipos específicos de suelo.

El trabajo de Pote et al., citados por Wolf et al. (2009), supera las críticas de Kleinman et al. (2007) reportando para las 54 parcelas evaluadas con muestras obtenidas entre 0-2 cm y sobre una cobertura de *Festuca*

arundinacea schreber obteniendo valores (ppm) entre 54-490 (media de 198), 27-592 (media 231) y 14-110 (media 61) para los métodos P Mehlich III, P Bray I y P WEP, respectivamente y con correlaciones con el P disuelto de $R^2=0,72$, $0,75$ y $0,82$ para dichos métodos.

2.7 EQUIVALENTE FERTILIZANTE Y TASA DE DESCENSO ANUAL

Según Castro et al. (1981b), el equivalente fertilizante (EF) representa la dosis ($\text{kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) necesaria a agregar para aumentar al año siguiente el valor de P Bray I del suelo en una parte por millón (ppm) de P a una profundidad de 15 cm. Posteriormente, estos autores, denominaron al momento de aplicación del fertilizante como año cero y definieron que, para el caso de superfosfato, para los diferentes suelos del país, los valores de EF oscilaban entre 5 y 10 (Debe recordarse que la unidad P_2O_5 da resultados 2,29 veces mayor a la unidad P).

Baethgen y Pérez (1981), sin embargo, en un ensayo instalado sobre un Brunosol eútrico lúvico de la Unidad Kiyú, aplicando fertilizante superfosfato y con pasturas (mezcla de trébol blanco, alfalfa y festuca) sembradas con el sistema convencional reportaron valores de EF para Bray I de 16,6 y 20,2 $\text{kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ en la profundidad de 0-15 cm, para el primer y segundo año postfertilización respectivamente. Estos autores también enfatizaron que los valores de EF encontrados por ellos, eran mucho mayores al reportado por Castro et al. (1981b), para este mismo tipo de suelo.

Cabe señalar que el valor de EF también podría estimarse teóricamente, mediante una simple conversión de unidades, considerando que una hectárea en los primeros 15 cm tiene un volumen de 1500 m^3 , que la densidad aparente (DAP) del suelo es de $1,25 \text{ ton/m}^3$, por lo cual la masa de suelo sería de 1875 ton ha^{-1} y 1 ppm de esa masa equivaldría a $1,875 \text{ kg ha}^{-1}$. Esto quiere decir que, si todo el P aplicado quedara disponible (100% de eficiencia), para aumentar 1 ppm el nivel de P Bray I del suelo deberíamos agregar $1,875 \text{ kg de P ha}^{-1}$ o $4,3 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ($1,875 \times 2,29$). Por lo tanto, en un suelo donde se estimó un $\text{EF}=10$, la eficiencia a tiempo cero sería de 43% ($4,3/10$) y de 25% ($4,3/17$) si el valor de EF fuera 17.

Otros autores, Rubio et al. (2007), analizaron 71 suelos (orden Molisoles) representativos de la región pampeana de Argentina y muestreando de 0-20 cm, calcularon el EF de P a los 45 días de la aplicación (el método de determinación de P asimilable que utilizaron fue el P Bray I), obteniendo un valor de EF de $10,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (considerando una DAP de $1,2 \text{ ton/m}^3$). Dichos

autores, utilizaron el coeficiente b promedio (0,52) de las funciones lineales determinadas al relacionar el incremento de P extractable en ppm en función de la dosis de P (ppm) agregada.

Hernández (2010), indicó una relación exponencial entre el P agregado y el incremento del P asimilable por análisis del suelo, lo que indica que para aumentar las primeras ppm de P asimilable, se consume más fertilizante que el que consume un incremento igual en valores más altos de P asimilable. Por ejemplo, para subir el valor de análisis del suelo de 2 a 4 ppm habría que agregar más fertilizante que para pasar de 10 a 12 ppm. Castro et al. (1981b), reportaron que cuando el EF se determinó al año de la aplicación de fertilizante la relación entre dosis y P Bray I fue lineal y sólo en pocos casos esta fue exponencial.

Por otro lado, Hernández (2010), plantea que los coeficientes de la tasa de descenso anual (TDA) miden el porcentaje de P lábil aumentado por la fertilización que pasa anualmente a formas fijadas no asimilables. Según Castro et al. (1981b), estos porcentajes varían entre 28 y 50% para suelos del Uruguay, usando como fertilizante al superfosfato de calcio.

Hernández (2010), expresa que teóricamente el equilibrio al que se llegaría en un largo tiempo sería casi el mismo al que se partió antes de la fertilización. Esto implicaría que el P disponible en el suelo no podría aumentar y que siempre volvería al valor inicial en el largo plazo.

2.8 ANTECEDENTES EDAFOLÓGICOS DE LOS SUELOS

Los muestreos de suelo que se realizaron, se encuentran como se aprecia en la Figura 2, en las siguientes unidades de suelo: Isla Mala, San Gabriel – Guaycurú, San Jacinto y Tala Rodríguez.



Figura 2. Unidades de suelo correspondiente a cada sitio de estudio.

A continuación, se citan las características principales de las unidades según el MGAP. DIRENARE (1986).

2.8.1 Unidad Isla Mala

Material formador: sedimentos limo-arcillosos y removilizaciones de Basamento Cristalino alterado.

Relieve: lomadas fuertes aplanadas y colinas.

Erosión y pedregosidad: ligera y además es ligeramente pedregoso y rocoso.

Grupos CONEAT asociados: 10.8b, 10.12 y 10.3.

Suelos dominantes: Brunosol eútrico lúvico Fr, Brunosol eútrico típico LAcv y Vertisol rúptico lúvico Fr.

Suelos asociados: Brunosol subeútrico háplico ArFrGvs.

2.8.2 Unidad San Gabriel – Guaycurú

Material formador: Basamento Cristalino (migmatitas y granitos, raramente ectinitas) alterados y retranspirados; parcialmente recubiertos por sedimentos limo arcillosos de débil espesor.

Relieve: colinas cristalinas algo rocosas con lomadas fuertes.

Erosión y pedregosidad: nula erosión, ligera rocosidad y moderadamente pedregoso.

Grupos CONEAT asociados: 03.3, 5.01c, 5.01b, 5.4, 5.5 y 5.02b.

Suelos dominantes: Brunosoles subeútricos (eútricos), háplicos Fr (FrGv)/ArFr (ArFrGv) superficiales/moderadamente profundos (profundos), pedregosos, (ródicos).

Suelos asociados: Brunosoles subeútricos típicos / lúvicos ArFr (ArFrGv) / Fr (FrGv) hidromórficos, (ródicos) Brunosoles eútricos lúvicos Fr.

2.8.3 Unidad San Jacinto

Material formador: sedimentos limo-arcillosos / areniscas cretácicas. Basamento Cristalino.

Relieve: lomadas fuertes.

Erosión y pedregosidad: erosión severa, pedregosidad y rocosidad nula. Suelos no inundables.

Grupos CONEAT asociados: 10.8a.

Suelos dominantes: Brunosol eútrico LAc y Vertisol rúptico lúvico Lac.

Suelos asociados: Brunosol eútrico típico ArAc y Vertisol rúptico Lúvico ArAc.

2.8.4 Unidad Tala Rodríguez

Material formador: sedimentos limos arcillosos de Libertad / Raigón.

Relieve: lomadas suaves a fuertes.

Erosión y pedregosidad: erosión moderada a severa, sin rocosidad ni pedregosidad.

Grupos CONEAT asociados: 09.4 y 10.8b.

Suelos dominantes: Brunosol eútrico y Vertisol rúptico lúvico.

Suelos asociados: Brunosoles eútricos lúvicos limo-arcillosos y Solonetz Solodizados melánicos francos.

2.9 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DOMINANTES

Los suelos dominantes para las distintas unidades presentan las siguientes características:

Brunosoles eútricos: se destacan por un alto nivel de bases, fertilidad alta, materia orgánica elevada, estable y textura fina, los cuales se diferencian de los Vertisoles por tener una textura algo más liviana y ausencia de propiedades vérticas. Presentan buena aptitud para uso agrícola y pastoril muy diversificado, con pocas limitaciones. No son suelos aptos para forestación, aunque tienen escasas restricciones, pero a veces son de espesor menor al ideal y topografía algo fuerte. Según Altamirano et al. (1976), *“Los Brunosoles eútricos típicos comprenden a los suelos con horizonte argilúvico y que carecen de transición abrupta entre los horizontes A y B y pueden presentar horizontes transicionales A3 o B1, en tanto que los Brunosoles eútricos lúvicos agrupa a los suelos con horizonte argilúvico más desarrollado y que en general carecen de horizontes transicionales A3 o B1”*.

A diferencia de los Brunosoles eútricos, los Brunsoles subeútricos presentan un contenido de bases, materia orgánica, fertilidad y textura media. Además, cuentan con una profundidad, permeabilidad e infiltración variable y una estructura moderada o débil. La aptitud para uso agrícola es moderada con limitaciones de grado variable, erodabilidad media a alta, riesgo de degradación medio o bajo y pasturas naturales de productividad regular a buena, aunque inferior a la de Brunosoles eútricos.

Los Vertisoles presentan características muy similares a los Brunosoles en cuanto a fertilidad, textura y aptitud de uso del suelo. La principal diferencia es la presencia en éstos de propiedades vérticas dado por la presencia de esmectitas, como microrelieve, caras de deslizamiento y doble perfil. *“Los Vertisoles rúpticos son los que presentan doble perfil asociado generalmente con microrelieve de ondas. Esto origina diferencias en microclima, lo que unido a las diferentes propiedades físicas y químicas que presentan las fases, determinan diferencias en la vegetación natural de las microdepresiones y microelevaciones. Los Vertisoles rúpticos lúvicos representan a los Vertisoles rúpticos que poseen un horizonte argilúvico horizontalmente discontinuo.”* (Altamirano et al., 1976).

Por su parte los Argisoles, se caracterizan por contar con una fertilidad media a baja, textura media a liviana, diferenciación textural fuerte, estructura moderada o débil, permeabilidad lenta, drenaje algo pobre a moderado, erodabilidad media a alta y con arraigamiento limitado. El uso queda algo restringido para cultivos por exceso de agua en invierno y deficiencia en verano.

Los Argisoles dístricos son suelos con un horizonte superficial que presenta una capacidad de intercambio catiónico de 10 meq./100 gr. de suelo (100 cmc kg⁻¹) o menor. En el caso de los Argisoles dístricos ócricos, cuentan con un horizonte ócrico.

Los Argisoles dístricos ócricos abruptos, presentan un cambio textural abrupto o con un horizonte álbico discontinuo o de menos de 3 cm de espesor.

2.10 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS

En el Cuadro 3 se presenta la caracterización físico - química de los suelos en los sitios donde se instalaron los ensayos con los datos analíticos y descriptivos que se consideraron más importantes y los tipos de suelos obtenidos de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1.000.000 del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Los datos de textura, pH, MO y BT representan el promedio de los 3 bloques para el tratamiento testigo en la primera fecha de muestreo y para las dos profundidades.

Cuadro 2. Caracterización físico - química de los suelos en los sitios donde se instalaron los ensayos.

Profundidad (cm)	Sitio	Tipo de suelo	Unidad cartográfica	Textura	pH (agua)	% MO	P Bray I*	Bases (cmc kg ⁻¹ de suelo)**			
								Ca	Mg	K	Na
0-7,5 cm	Candil	Brunosol Eútrico	Isla Mala (cercano a límite con San Gabriel -Guaycurú)	FACAr-FAC	5,7	5,4	14,5	16,7	4,0	0,52	0,33
	NP	Brunosol Subeútrico	Tala Rodríguez (cercano a límite con San Jacinto)	FAC	5,2	4,7	11,4	9,3	3,8	0,26	0,43
	San José	Brunosol Subeútrico	San Gabriel - Guaycurú	FACL	5,2	6,1	17,0	11,8	3,9	0,72	0,35
	Tossi	Brunosol Eútrico	Isla Mala	FACL - FAC	5,3	5,2	9,2	15,7	4,1	0,60	0,33

7,5-15	Candil	Brunosol Eútrico	San Gabriel -Guaycurú (cercano a límite con Isla Mala)	FACAr-FAC	6,4	3,1	4,0	18,4	4,2	0,41	0,42
	NP	Brunosol Subeútrico	Tala Rodríguez (cercano a límite con San Jacinto)	FAC	5,8	3,1	5,2	9,5	4,4	0,38	0,62
	San José	Brunosol Subeútrico	San Gabriel -Guaycurú	FACL	5,4	4,3	4,9	14,6	4,7	0,52	0,51
	Tossi	Brunosol Eútrico	Isla Mala	FACL - FAC	5,8	4,6	2,8	17,9	4,3	0,54	0,39

*Datos promedio de los tres bloques para dosis 0 kg P₂O₅ ha.⁻¹ al momento de instalar el ensayo y previo a la refertilización.

**Centimoles carga por kilogramo de suelo

Cuadro 3. Concentración de bases totales (BT) y proporción de cada catión sobre la suma de los mismos.

Sitio	BT	Proporción de cada catión sobre el total			
		%Ca	%Mg	%K	%Na
Candil	21,6	77,4	18,7	2,4	1,5
NP	14,1	65,9	26,9	4,1	3,1
San José	16,7	70,3	23,3	4,3	2,1
Tossi	20,7	75,9	19,6	2,9	1,6

En base a los resultados observados de pH (valores mayores a 5,2), se asumió que no hay Al intercambiable, por lo tanto, que el Al es cero. En consecuencia, las bases totales son iguales a la CIC.

Teóricamente para los suelos de Uruguay, los valores esperados de Ca, Mg, K y Na sobre el total serían de 70-80% Ca, 10-20% Mg, 10% Na y K. Como se aprecia en el Cuadro 3, los valores se encuentran en el entorno de los rangos mencionados.

Contrastando los datos de los antecedentes teóricos para los distintos sitios con los obtenidos luego de realizados los análisis físicos y químicos de las muestras, concluimos que coincidieron con los encontrados como dominantes en la bibliografía.

2.11 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) Y SATURACIÓN DE BASES DE LOS SUELOS (SB)

La CIC se define como la máxima cantidad de cationes adsorbidos que se presentan en forma intercambiable, expresada como centimóles de carga por kilo de suelo (cmc kg^{-1} suelo) a un cierto pH. Eso es de suma importancia desde el punto de vista agronómico, ya que le proporciona al suelo capacidad buffer con respecto a los cambios en la composición catiónica de la solución, asegurando la nutrición catiónica de las plantas.

CIC pH suelo= bases totales + aluminio

La CIC de un suelo depende de las arcillas y la materia orgánica (MO) que tiene cargas negativas con cationes adheridos que están en equilibrio con la solución del suelo. En la MO, la carga negativa operativa depende esencialmente del pH.

Además, la CIC de la mayoría de los suelos aumenta con el pH (CIC dependiente del pH). A pH muy bajo solamente son activas y capaces de retener cationes intercambiables, las cargas “permanentes” de las arcillas y una proporción baja de las cargas de los coloides orgánicos. A medida que aumenta el pH, el hidrógeno (H) retenido por los coloides orgánicos y por los filosilicatos arcillosos se ioniza y se torna intercambiables (cargas dependientes del pH). También los hidroxialumnio son eliminados de posiciones de intercambio formándose $\text{Al}(\text{OH})_3$ y liberándose entonces sitios de intercambio adicionales en los coloides minerales. Da como resultado, un aumento de la carga negativa de los coloides y por lo tanto de la CIC.

Por su parte, la SB es una importante propiedad de los suelos, la cual se define como el porcentaje de la CIC total a un cierto pH que es ocupada por cationes de carácter básico como Ca, Mg, Na y K.

La SB se relaciona al pH y es un indicador del nivel de fertilidad del suelo. Para un suelo con una determinada composición orgánica y mineral, el pH y el nivel de fertilidad se incrementan con un aumento en el grado de saturación de bases.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de estudiar la variabilidad en los niveles de P de los suelos de la cuenca del río Santa Lucía se realizaron muestreos en ensayos en los siguientes sitios: San José, Candil (Florida), Tossi (Florida) y NP (Canelones).

3.1 UBICACIÓN DE LOS SITIOS

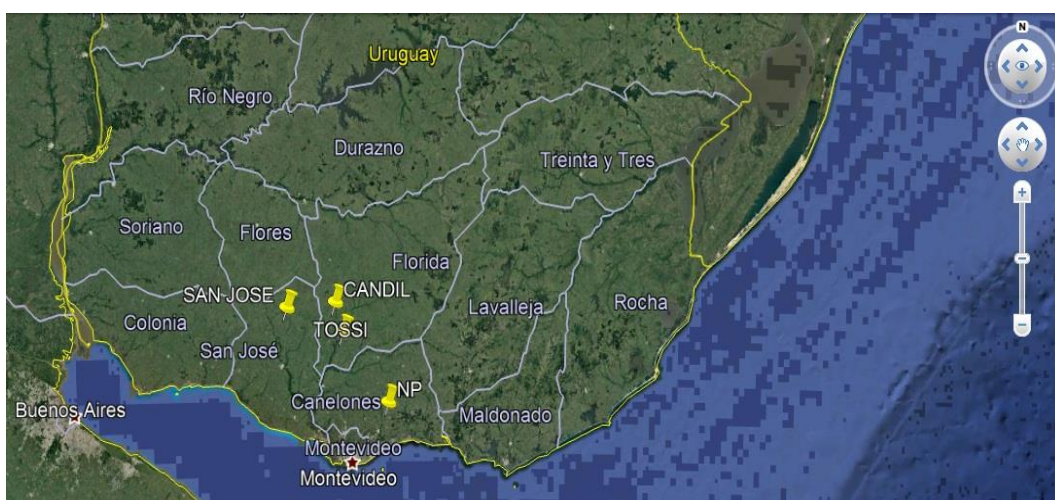


Figura 3. Ubicación de los sitios en el país

3.2 INSTALACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS Y MUESTREOS

Los datos de las fechas de instalación, ubicación georeferenciada, fertilización, cobertura y detalles del muestreo de los diferentes sitios se presentan en el Cuadro 4.

Previo a la instalación de los ensayos, se tomaron con calador muestras de suelo de cada sitio por bloque (3) y a 2 profundidades (0-7,5 cm y de 7,5-15 cm). Inmediatamente, se aplicaron 4 dosis de P equivalentes a 0, 40, 80 y 120 Kg de P_2O_5 ha^{-1} (superfosfato triple), al voleo y en cobertura sobre praderas de segundo año (refertilización). Posteriormente, luego de cada toma se sacaron muestras adicionales de suelo de las mismas profundidades, por tratamiento. El total de muestras de suelo extraídas fue de 192 (cada muestra se compone de 8 tomas). El tamaño de las parcelas fue de 4 por 3 metros.

En cada parcela, al mismo tiempo que se realizaron los muestreos de suelo, se hicieron cortes en las pasturas, retirando el forraje obtenido.

Cuadro 4. Fecha de instalación, cobertura de los ensayos y detalle del muestreo.

Sitio	Ubicación Geo-referenciada	Fecha de instalación y fertilización	Cobertura	Cantidad de muestras	Fecha de muestreo y días desde la instalación
Candil	Latitud: 34°2'58.57"S Longitud: 56°19'8.98"O	02-04-2014	Festuca, trébol blanco (TB) y restos secos (RS)	72	28-05-14 (56 días) 12-08-17 (132 días) 23-10-14 (204 días)
NP	Latitud: 34°37'50.14"S Longitud: 55°54'22.02"O	27-05-2014	Cebadilla, TB y RS	24	28-08-17 (93 días)
San José	Latitud: 34°04'38.91"S Longitud: 56°42'00.59"O	27-03-2014	Raigrás, TB, lotus y RS.	24	29-05-14 (63 días)
Tossi	Latitud: 34°13'24.60"S Longitud: 56°15'34.04"O	04-04-2014	Raigrás, TB, lotus, TR y RS	72	28-05-14 (56 días) 19-08-17 (137 días) 23-10-14 (202 días)

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS EN LOS DISTINTOS SITIOS

3.3.1 Indicadores físicos y químicos para la clasificación de los suelos en los sitios

Para la caracterización se realizaron los análisis de: textura, materia orgánica (MO), pH y bases totales (BT).

El análisis de textura (físico) se realizó en el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (M.G.A.P.) de acuerdo al método de la pipeta (Gee y Bauder, 1986).

Tanto para la determinación de las BT, MO y pH en agua, se analizaron las muestras del primer muestreo en los testigos (muestras con dosis 0 de fertilizante) de cada bloque y para las dos profundidades. El método utilizado en la determinación de la MO fue el de Walkley y Black (1934), y para las BT el de Thomas (1982).

3.4 DETERMINACIÓN DEL P ASIMILABLE EN EL SUELO POR VARIOS MÉTODOS

En todas las muestras de suelo se realizaron los siguientes métodos de determinación de P asimilable: P Bray I, P Mehlich III, P Cítrico y P WEP, que se describen a continuación.

3.4.1 Determinación de P asimilable por el método P Bray I

Para la extracción se pesaron 2,5 g de suelo seco y molido de cada muestra y se colocaron en los frascos de plástico de 50 ml. Luego se agregaron 17,5 ml de solución extractiva (Cuadro 1) mediante pipeta graduada, se agitó a mano durante 1 minuto y se filtró sobre los vasos ya preparados con el papel de filtro Whatman No. 2. Debe recordarse que existen otras versiones de P Bray I que utilizan relación de extracción 1:10 y 5 minutos de agitación en donde se obtienen valores de P disponible mayores.

Se determinó colorimétricamente por molibdato de amonio con reducción con cloruro stannoso, medido por transmitancia en fotocolorímetro (Spectronic 20) a 660 nanómetros (nm) de longitud de onda, incluyendo una muestra control por cada serie de frascos y una escala para el cálculo del factor de conversión.

3.4.2 Determinación de P asimilable por el método P Mehlich III

Para la extracción se tomaron 2,5 g de suelo seco y molido de la muestra y se colocaron en los frascos de plástico de 50 ml. Luego se agregaron 25 ml de solución extractiva (Cuadro 1) mediante dispensador. Posteriormente, se agitó en agitador mecánico durante 5 minutos y se filtró sobre los vasos ya preparados con el papel de filtro Whatman No. 2.

Se determinó colorimétricamente por la metodología de Murphy Riley (ácido ascórbico), medido por transmitancia en fotocolorímetro (Spectronic 20) a 880 nanómetros (nm) de longitud de onda, incluyendo una muestra control por cada serie de frascos y una escala para el cálculo del factor de conversión.

3.4.3 Determinación de P asimilable por el método ácido cítrico (0,5%)

Para la extracción, se pesaron 5 g de suelo seco y molido en frascos de agitado. Posteriormente se agregaron 50 ml de solución extractiva (Cuadro 1) con probeta de 50 ml y se agito en agitador durante 30 minutos. A continuación, se filtró con papel Whatman No. 2.

Se determinó colorimétricamente por la metodología de Murphy Riley (ácido ascórbico), utilizando ácido sulfúrico 2,5 N en lugar de 5 N de otras técnicas para evitar problemas en la colorimetría. Se midió absorbancia en espectrofotómetro (UNICAM 5675) a 880 nanómetros (nm) de longitud de onda, incluyendo una muestra control por cada serie de frascos y una escala para el cálculo del factor de conversión.

3.4.4 Determinación de P asimilable por el método P WEP

Se realizaron modificaciones al método de Kleinman et al., citados por Wolf et al. (2009), para adaptarlo a los materiales disponibles en el laboratorio.

Las muestras analizadas se formaron mezclando suelo seco y molido obtenidas de la unión de partes iguales de submuestras de los diferentes bloques para un mismo sitio, fecha y profundidad.

Para la extracción, se pesaron 3 g de suelo y se colocaron en botellas plásticas de 500 ml. Luego se le agrego 300 ml de agua desionizada. Se agitaron los frascos por 60 minutos y de cada frasco se tomaron dos alícuotas en tubos de centrífuga de 50 ml y se completaron las 2/3 partes (30 ml aproximadamente) del volumen del tubo. A diferencia del método original en el cual se pesa 2 g de la muestra a evaluar y se lo agrega a 200 ml de agua en un tubo de centrífuga de 250 ml.

El tiempo de agitado y la relación suelo: solución (1:100) se mantuvieron como en el método original.

Posteriormente, se centrifugaron los tubos a 1500 revoluciones por minuto (rpm) por 10 min.

Luego de centrifugados los tubos se tomaron 20 ml del sobrenadante de cada tubo y se colocaron en tubos de ensayo de vidrio para desarrollar la colorimetría en un volumen final de 28 ml.

Se sustituyó el método de determinación ICP (espectroscopía de plasma de argón acoplado inductivamente) que emplea la técnica original por el de colorimetría Murphy Riley. Se midió absorbancia en espectrofotómetro (UNICAM 5675) a 880 nanómetros (nm) de longitud de onda, incluyendo una muestra control por cada serie de frascos y una escala para el cálculo del factor de conversión.

3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Las muestras de suelo se tomaron de ensayos instalados en los sitios de estudio, los cuales presentaban un diseño en bloques completos al azar (BCA) con 3 bloques por sitio. Dentro de cada bloque se asignaron 4 tratamientos que fueron 4 dosis (0, 40, 80 y 120 kg. de P_2O_5 ha⁻¹) de fertilizante súperfosfato triple aplicado al voleo y en cobertura sobre praderas de segundo año. Los bloques se encontraban anidados en cada sitio, ya que el mismo bloque no es igual en todos los sitios.

3.5.1 Modelo estadístico

$$Y_{(ij)} = \mu + D_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

$Y_{(ij)}$ = P lábil en el suelo

μ = media poblacional

D = efecto de la i-ésima dosis de fósforo

β = efecto del j-ésimo 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.

3.5.2 Análisis estadístico

Con el paquete estadístico R incluido en el programa InfoStat (versión 2017e) se realizaron los análisis de la varianza para las variables P Bray I, P Mehlich III, P Cítrico y P WEP. Para cada sitio, fecha y ambas profundidades se analizó el efecto de la dosis de P agregada en la concentración de P lábil estimada con los diferentes métodos, utilizando el procedimiento modelos lineales generales y mixtos del paquete estadístico de dicho programa. La suma de los cuadrados de tratamiento se dividió en tres contrastes no ortogonales: "cero versus el resto", lineal y cuadrático, en todos los sitios.

Se realizaron regresiones entre los resultados de los diferentes métodos de determinación de P (P Bray I, P Mehlich III, Cítrico y WEP) y las dosis aplicadas en los sitios para las distintas fechas de muestreo.

Además, se realizaron regresiones entre los métodos ya mencionados con el fin de determinar la relación existente entre ellos y establecer cuál de los usualmente usados en Uruguay, se correlaciona mejor con WEP.

3.6 RESOLUCIÓN DE DERIVADAS EN LAS ECUACIONES DIFERENCIALES

Todas las operaciones de derivación para la estimación de parámetros de P para las recomendaciones de fertilización (equivalente fertilizante y la tasa de descenso) y dosis óptima fueron corroboradas con maxima-online: online algebra calculator.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RELACIÓN ENTRE EL VALOR DEL P LÁBIL DEL SUELO CON LAS DOSIS DE P APLICADA Y EL MOMENTO DE MUESTREO

Cuadro 5. Concentraciones promedio de P lábil (ppm) y parámetros estadísticos (%) según distintos métodos de análisis para los diferentes sitios, según dosis de P_2O_5 ha^{-1} aplicada.

Profundidad 0-7,5 cm			Dosis (kg P_2O_5 ha^{-1})				Promedio (ppm)	SE ¹ (ppm)	CV ² (%)	Probabilidad de diferentes contrastes (%)			
Método analítico	Sitio	Fecha	0	40	80	120				P ³	C1 ⁴	C2 ⁵	C3 ⁶
P Bray I	Candil	28-05	14,0	18,0	20,0	47,3	25,0	1,1	15,2	0,03	0,10	NS ⁷	0,04
		12-08	10,0	17,0	15,0	17,0	14,7	0,9	19,4	NS (9,45)	2	NS	4,30
		23-10	9,3	9,6	15,0	15,8	12,4	0,9	21,2	6,71	NS	NS	NS
	NP	28-08	4,1	5,9	10,0	23,2	10,8	0,4	13,5	0,04	0,06	NS	0,10
	San José	29-05	12,0	13,0	15,0	19,8	14,9	1,0	19,8	NS (5,89)	NS	NS	NS
	Tossi	28-05	8,1	14,0	16,0	25,0	15,6	0,6	12,0	0,07	0,04	NS	0,10
		19-08	5,7	8,6	12,0	12,8	9,8	0,7	22,9	2,53	1,00	3,80%	NS
		23-10	7,4	8,7	11,0	11,7	9,7	0,9	29,1	NS	NS	NS	NS

	Promedio		8,9	11,7	14,2	21,6	14,1						
P Mehlich III	Candil	28-05	17,0	23,0	30,0	71,6	35,3	3,0	29,3	0,29	0,62	NS	0,48
		12-08	13,0	15,0	16,0	19,7	15,8	1,1	22,1	NS	NS	NS	NS
		23-10	8,8	11,0	11,0	18,5	12,3	0,6	14,7	3,03	NS	NS	NS
	NP	28-08	5,4	7,3	14,0	33,1	14,9	1,1	24,7	0,20	0,35	NS	NS (0,53)
	San José	29-05	21,0	16,0	22,0	36,4	23,9	1,7	20,7	3,20	NS	NS	NS
	Tossi	28-05	11,0	19,0	21,0	31,9	20,6	1,0	14,4	0,07	0,05	NS	0,10
		19-08	5,8	11,0	15,0	16,0	12,0	1,0	25,7	2,25	0,71	2,63	NS
		23-10	7,2	8,3	12,0	13,7	10,3	0,7	20,9	3,26	3,10	NS	NS
	Promedio		11,1	13,7	17,7	30,1	18,1						
P Cítrico	Candil	28-05	18,0	20,0	26,0	58,6	30,5	2,5	27,1	0,43	1,49	NS	NS
		12-08	12,0	16,0	20,0	9,5	14,5	0,6	13,0	NS (0,52)	4,03	0,19	3,69
		23-10	11,0	19,0	14,0	15,4	14,5	0,9	18,9	NS (7,57)	2,82	NS	2,46
	NP	28-08	4,4	6,6	13,0	22,7	11,8	1,3	33,6	1,12	1,56	NS	NS
	San José	29-05	15,0	21,0	17,0	21,1	18,5	0,5	8,0	1,73	0,75	NS	NS (0,50)
	Tossi	28-05	9,0	16,0	20,0	25,4	17,7	0,8	13,7	0,29	0,08	0,99	1,01
		19-08	6,3	11,0	10,0	16,9	11,1	0,8	22,4	1,07	0,82	NS	0,73
		23-10	8,6	9,8	11,0	13,4	10,6	0,8	23,3	NS	NS	NS	NS
	Promedio		10,5	14,9	16,3	22,9	16,1						

P WEP	Candil	28-05	8,0	8,3	14,0	24,2	13,5	ND ⁸	ND	ND	ND	ND	ND
		23-10	2,9	4,7	6,6	5,6	5,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	NP	28-08	4,3	6,1	5,5	13,7	7,4	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	San José	29-05	1,8	8,2	6,6	15,3	8,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Tossi	28-05	6,2	9,8	12,0	17,9	11,6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		23-10	6,6	2,8	2,9	6,2	4,6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Promedio		5,0	6,7	7,9	13,8	8,3	ND	ND	ND	ND	ND	ND

¹SE= error estándar

²CV= coeficiente de variación

³P= efecto principal del tratamiento

⁴C1= contraste no ortogonal “cero vs. resto”

⁵C2= contraste no ortogonal “cero vs. lineal”

⁶C3= contraste no ortogonal “cero vs. cuadrático”

⁷NS= no significativo a $P \geq 0,05$.

⁸ND= no hay dato. Datos sin repetición, muestra compuesta de los 3 bloques para un mismo sitio, fecha y Profundidad.

Nota: valores obtenidos en el año 2014.

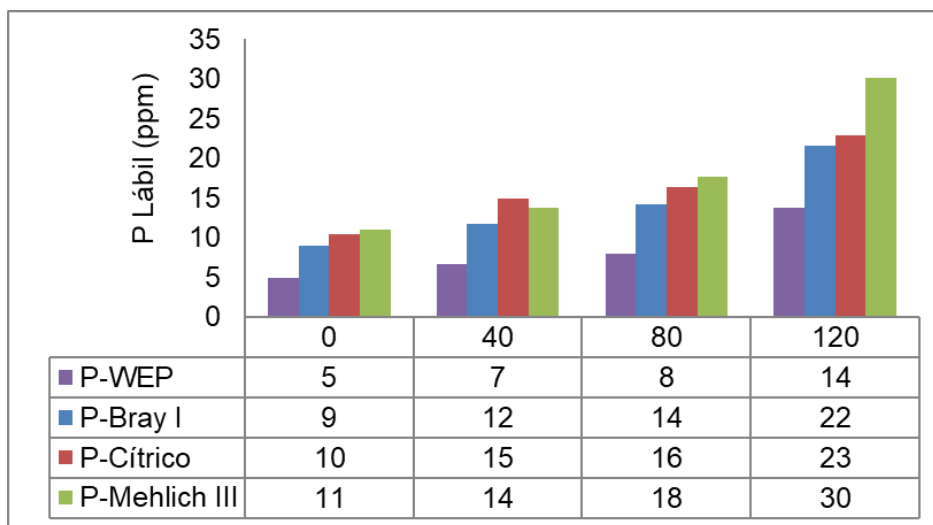


Figura 4. Resultados promedios de P lábil (ppm) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P₂O₅ há⁻¹) para la profundidad de 0-7,5cm.

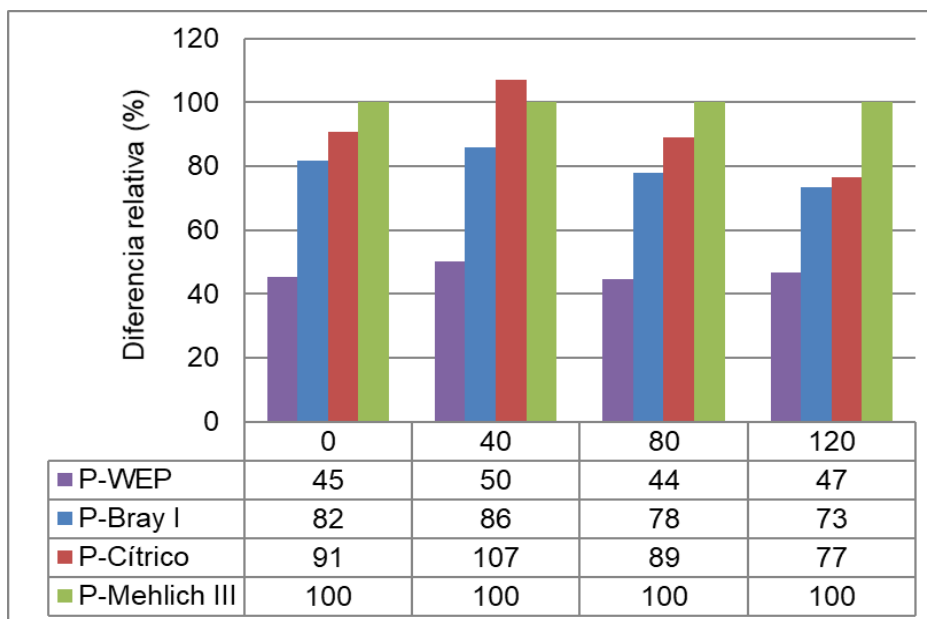


Figura 5. Diferencias relativas entre métodos (%) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P₂O₅ há⁻¹) para la profundidad de 0-7,5cm.

En términos generales y coincidiendo con los reportados por Hernández, citado por Bermúdez et al. (2008), se aprecia en el Cuadro 5 y las Figuras 4 y 5, que los valores promedios de P extraídos en la profundidad 0-7,5

cm, para los distintos métodos siguen la siguiente secuencia: P Mehlich III > P Cítrico > P Bray I > P WEP.

En cuanto a P WEP, los valores en la extracción de este método son siempre menores a los determinados con los otros, debido a que la solución extractiva es agua desionizada la cual extrae las formas disueltas o fácilmente solubles de P en el suelo. El resto de los métodos utilizados en este trabajo, en cambio, utilizan extractantes químicos que solubilizan o forman complejos con los cationes que retienen al P.

El método P Mehlich III, debido a que utilizó una relación suelo: solución de 1:10 y un tiempo de agitado de 5 min obtuvo valores de P disponible mayores. En cambio, para P Bray I, se usó una relación 1:7 y un tiempo de agitado de 1 min. En otros países tal como lo reportan Sawyer y Mallarino (1999), al comparar estos métodos en iguales condiciones de relación suelo: solución y tiempo de agitado, los valores obtenidos de P disponible son similares.

Otro aspecto a resaltar de la Figura 4 es que, con el aumento de la dosis agregada, la amplitud de diferencia en valores absolutos entre los métodos se incrementó y en promedio, para cada método, se obtuvieron mayores valores de P disponible (ppm), para todos los sitios. En cambio, si se observa la Figura 5, se puede ver que, en términos relativos, el incremento de los valores de P lábil de cada método fue proporcional al agregado de P, hubo un aumento, pero siempre se mantuvo en porcentajes similares, tomando como referencia el método P Mehlich III que fue el que mayores valores remitió.

Para todos los métodos y sitios en la profundidad de 0-7,5 cm en general se encontró una respuesta al agregado de P, donde los niveles de P disponible aumentaron con el incremento de la dosis. Siguiendo la tendencia de los otros métodos estudiados, el P WEP, en general también mostró valores mayores en el análisis de P en suelo con el aumento de la dosis, al igual que lo encontrado por Bond et al. (2006).

Observando los valores del Cuadro 5 en detalle, a pesar de encontrar esa tendencia general similar mencionada anteriormente, existieron casos específicos donde la misma no se manifestó. Por ejemplo, en el sitio San José para el método P Mehlich III o el sitio Candil en la fecha 23-10-2014 para el método Ácido Cítrico, se observó que los valores de P lábil no se incrementaron con la dosis de P_2O_5 agregada. Esto pudo deberse a errores analíticos en el laboratorio. Se asumió en estos casos que no hubo un error de muestreo, ya que se utilizó la misma muestra para realizar cada uno de los análisis, por lo tanto, se infirió que pudo haber una interacción entre el método y la muestra

que afectara el buen funcionamiento del mismo, donde alguna característica específica de la muestra interaccionara con algún componente de la solución extractiva e hizo que la tendencia encontrada para los demás sitios y métodos no se mantuviera. En estos casos se realizaron mayor cantidad de repeticiones, pero los resultados se mantuvieron.

La respuesta al agregado de P puede verse en los datos del Cuadro 5, tanto en los valores promedios de P asimilable como en los resultados de los contrastes realizados. A modo general, se observa que hay un efecto del tratamiento, en este caso, el agregado de fósforo, el cual se aprecia en los datos del indicador P en el Cuadro 5. Este indicador expresa que hay al menos una diferencia entre los valores de P lábil, ya que éstos son significativos en la mayoría de los casos ($p\text{-valor} \leq 0,05$), pero éste no determina cuál es esa diferencia. El C1 representa el “cero vs resto”, lo que significa que se comparó el tratamiento de 0 Kg P_2O_5 $há^{-1}$ contra las demás dosis (40, 80 y 120 Kg P_2O_5 $há^{-1}$). En la mayoría de los casos este contraste dio valores significativos, lo que quiere decir que hubo un aumento en el P asimilable asociado al agregado de P, hubo diferencias entre agregar o no P, independientemente de la dosis. Aquellos casos en que las diferencias no fueron significativas, coincidieron con los valores de P obtenidos en los muestreos realizados en los sitios Candil y Tossi entorno a los 200 días de la instalación del ensayo, mostrando que, con el paso del tiempo, los niveles de P lábil y las diferencias entre tratamientos van disminuyendo. Esto puede deberse como establece Hernández (2010) al proceso de fijación en donde el P lábil del suelo, reacciona con cationes como Al, Fe o Ca, o superficies de alta reactividad química, formando productos de muy baja solubilidad. Otra posible explicación, es que, en algunos análisis, la respuesta al agregado de P podría haber estado enmascarada por la alta variabilidad experimental, lo que se demuestra por los altos valores de CV obtenidos en esos sitios, como por ejemplo en el método P Bray I, en el sitio Tossi para el 23-10-14 la respuesta fue NS (aun cuando los valores en las parcelas fertilizadas aumentaron), siendo el CV encontrado de 29,1%.

El P asimilable extraído para los diferentes sitios fue mayor en Candil con respecto al resto aún sin fertilizar, seguido por San José y Tossi (comparten valores similares), y por último NP. Esta mayor diferencia podría explicarse inicialmente por las diferencias en la historia de fertilización de cada sitio. Este factor no se tomó en cuenta en este estudio, pero es de esperar que sea una de las principales causas de estas diferencias. Otros factores que también puede contribuir son la textura más gruesa y menor contenido de materia orgánica del sitio Candil las cuales podrían determinar una menor fijación del P agregado y por ende dejar más fósforo disponible y en solución, determinando valores de análisis de suelos mayores.

En la mayoría de los casos analizados, los resultados presentados en el Cuadro 5 revelan que los datos se ajustan mejor a una respuesta de tipo cuadrática (C3) que a una lineal (C2). Esto podría explicarse debido a que la disponibilidad de P que se establezca en el suelo dependerá de las propiedades físicas y químicas de éste (Larsen et al., López y Hernández, Burnham, Barber, McCollum, citados por Stewart y Sharpley, 1987) y, por lo tanto, los primeros kilogramos de P_2O_5 agregados serán más retenidos en distintas formas por el suelo que los incorporados posteriormente. Este tipo de respuesta indica que para elevar las primeras ppm de P asimilable se consume mayor cantidad de fertilizante fosfatado que lo que se consume para un incremento igual en valores de P asimilable más altos.

Cuadro 6. Concentraciones promedio de P lábil (ppm) y parámetros estadísticos (%) según distintos métodos de análisis para los diferentes sitios, según dosis de P_2O_5 ha⁻¹ aplicada.

Profundidad 7,5-15 cm		Fecha	Dosis (kg P_2O_5 há ⁻¹)				Promedio (ppm)	SE ¹ (ppm)	CV ² (%)	Probabilidad de diferentes contrastes (%)			
Método analítico	Sitio		0	40	80	120				P ³	C1 ⁴	C2 ⁵	C3 ⁶
P Bray I	Candil	28-05	3,7	3,7	4,7	8,7	5,2	0,6	33,8	3,74	NS	NS	NS
		12-08	3,8	3,5	3,9	4,6	4,0	0,4	30,9	NS	NS	NS	NS
		23-10	2,7	2,9	3,5	4,8	3,5	0,6	56,0	NS	NS	NS	NS
	NP	28-08	2,0	2,7	2,4	4,3	2,9	0,5	49,3	NS	NS	NS	NS
	San José	29-05	3,1	2,8	2,9	5,2	3,5	0,2	18,0	0,91	NS	NS	3,00
	Tossi	28-05	4,7	3,5	4,3	4,8	4,3	0,6	39,4	NS	NS	NS	NS
		19-08	2,5	3,2	3,5	3,3	3,1	0,2	17,4	NS	NS	NS	NS
		23-10	3,2	2,4	2,8	2,6	2,8	0,2	27,9	NS	NS	NS	NS
	Promedio		3,2	3,1	3,5	4,8	3,6						
P Mehlich III	Candil	28-05	4,9	4,5	4,7	7,5	5,4	0,7	39,6	NS	NS	NS	NS
		12-08	4,2	3,6	3,6	3,9	3,8	0,4	30,1	NS	NS	NS	NS
		23-10	4,3	4,2	5,7	10,0	6,1	0,6	32,9	3,46	NS	NS	NS
	NP	28-08	3,4	4,6	3,6	4,9	4,1	0,2	11,6	2,09	2,14	NS	0,41
	San José	29-05	3,6	5,7	5,1	6,0	5,1	0,5	27,7	NS	NS	NS	NS
	Tossi	28-05	2,9	5,3	4,2	4,2	4,2	0,3	21,3	NS	1,89	4,64	4,28
										(5,50)			

		19-08	2,6	3,0	3,1	2,7	2,9	0,3	37,7	NS	NS	NS	NS
		23-10	4,7	3,6	3,2	3,3	3,7	0,4	29,2	NS	NS	NS	NS
	Promedio		3,8	4,3	4,2	5,3	4,4						
P Cítrico	Candil	28-05	6,0	3,5	4,6	6,1	5,1	0,6	33,5	NS	NS	NS	NS
		12-08	4,6	3,4	3,5	3,6	3,8	0,5	43,0	NS	NS	NS	NS
		23-10	5,4	6,5	6,4	4,9	5,8	0,5	25,1	NS	NS	NS	NS
	NP	28-08	1,9	2,6	2,3	3,0	2,5	0,2	27,0	NS	NS	NS	NS
	San José	29-05	3,5	3,7	2,8	3,7	3,4	0,3	23,4	NS	NS	NS	NS
	Tossi	28-05	2,6	3,4	2,7	3,7	3,1	0,3	29,0	NS	NS	NS	NS
		19-08	2,6	2,9	2,9	2,9	2,8	0,2	18,0	NS	NS	NS	NS
		23-10	5,0	5,2	4,4	3,8	4,6	0,3	18,6	NS	NS	NS	NS
	Promedio		4,0	3,9	3,7	4,0	3,9						

¹SE= error estándar

²CV= coeficiente de variación

³P= efecto principal del tratamiento

⁴C1= contraste no ortogonal "cero vs. resto"

⁵C2= contraste no ortogonal "cero vs. lineal"

⁶C3= contraste no ortogonal "cero vs. cuadrático"

⁷NS= no significativo a $P \geq 0,05$.

Nota: valores obtenidos en el año 2014.

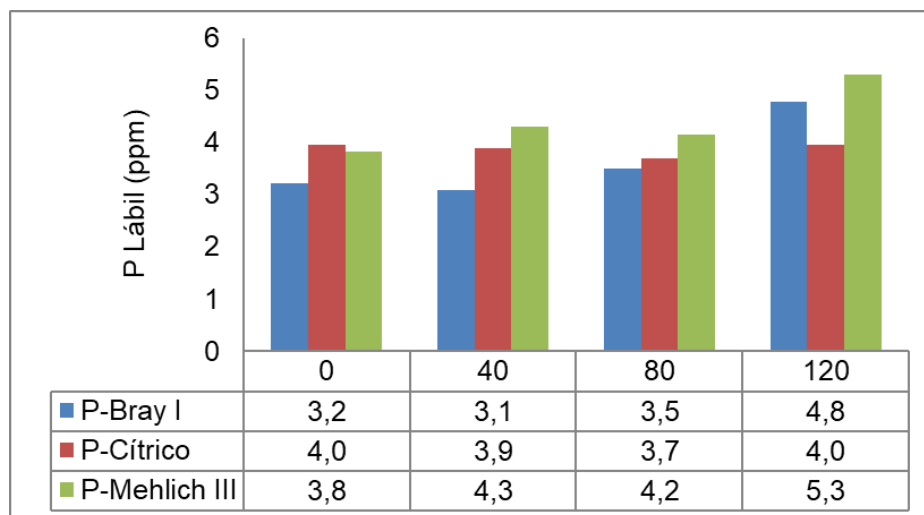


Figura 6. Resultados promedios de P lábil (ppm) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P₂O₅ há.⁻¹) para la profundidad de 7,5-15 cm.

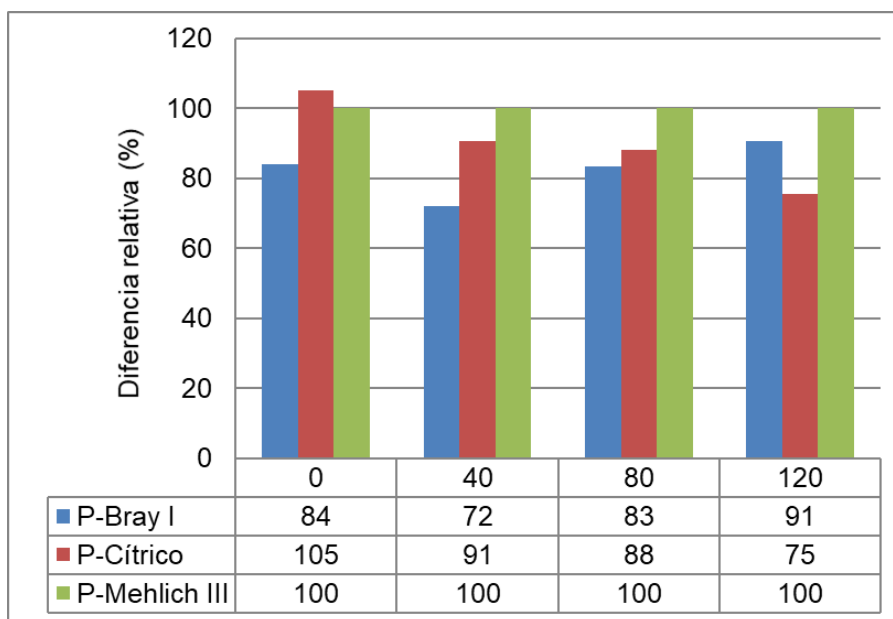


Figura 7. Diferencias relativas entre métodos (%) por métodos, en todos los sitios y dosis (0, 40, 80 y 120 kg P₂O₅ há.⁻¹) para la profundidad de 7,5-15 cm.

Como se observa en el Cuadro 6 y en las Figuras 6 y 7, para la profundidad de 7,5-15 cm no se encuentra una respuesta clara con respecto al agregado de P y al paso del tiempo como si se observó en la profundidad de 0-

7,5 cm. Tanto en el valor promedio de P asimilable para los diferentes sitios y fechas como en los contrastes no se encontró un cambio en los niveles de P con el agregado del fertilizante. En la generalidad de los casos para C1 (Cuadro 6) no se encontró diferencias significativas asociadas al agregado o no de P. Esto puede explicarse dado que en el caso del P al agregarse en superficie y tratarse de un nutriente no móvil quedaría concentrado en los primeros centímetros. *“La falta de incorporación de las aplicaciones en superficie de fertilizantes fosfatados y potásicos y de los residuos de los cultivos junto con el ciclaje de nutrientes a través de la absorción de los cultivos desde capas más profundas del suelo, produce estratificación de estos nutrientes inmóviles en la superficie del mismo. Esta estratificación junto a cambios en las relaciones cantidad/intensidad en profundidad (derivados de los cambios en pH, MO, etc.) resultan en que los cultivos presentan una alta dependencia de estos nutrientes concentrados en los primeros centímetros de suelo.”* (Bordoli, s.f.).

Comparando los Cuadros 5 y 6, los valores de P en el rango de 0 – 7,5 cm son mayores a los de 7,5 - 15 cm coincidiendo con lo reportado por Bordoli (s.f.). En este caso al tratarse de un sistema en SD, no se produce inversión ni mezcla del horizonte superficial, sumado a la característica mencionada anteriormente se origina una estratificación en los primeros cm del suelo. Esta fue cuantificada a modo de ejemplo para P Bray I y se determinó en un valor promedio (para las fechas 28-05-14 en Candil y Tossi y 29-05-14 para San José) de 4,23 veces más de P en superficie (Candil=4,83, Tossi=3,61 y San José = 4,26) usando la siguiente fórmula:

grado de estratificación= P Bray I 0-7,5 cm / P Bray I 7,5-15 cm.

En esta profundidad tampoco se establece una secuencia clara en cuanto al fosforo extraído por los diferentes métodos.

Para esta profundidad no se determinó P WEP dado que este indicador ambiental estaría relacionado con el P soluble en agua capaz de perderse en el agua de escurrimiento, por lo tanto, no sería de relevancia su determinación en esta profundidad, aunque podría serlo si existiera escurrimiento subsuperficial.

4.2 RELACIONES ENTRE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE P DISPONIBLE

4.2.1 Estimación de la relación entre métodos con análisis de regresión

Con el objetivo de establecer el grado de relación entre los distintos métodos de extracción de P disponible o asimilable se realizaron análisis de regresión para estimarla.

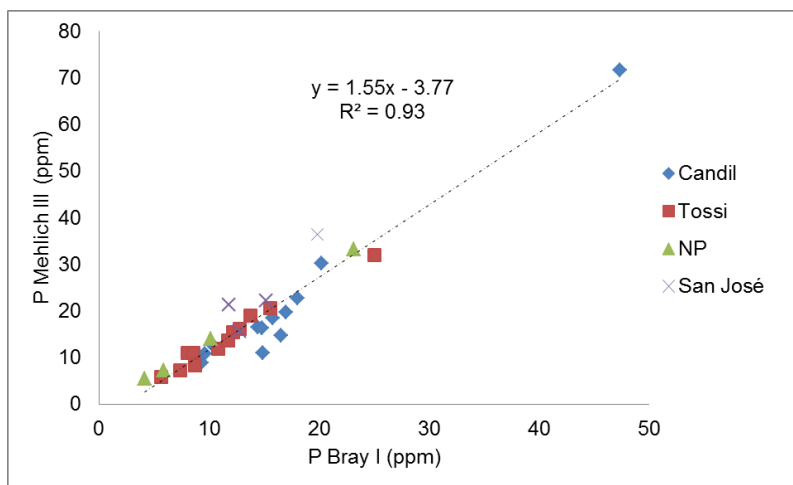


Figura 8. Relación entre el método de estimación de P Mehlich III y P Bray I para la profundidad de 0-7,5 cm.

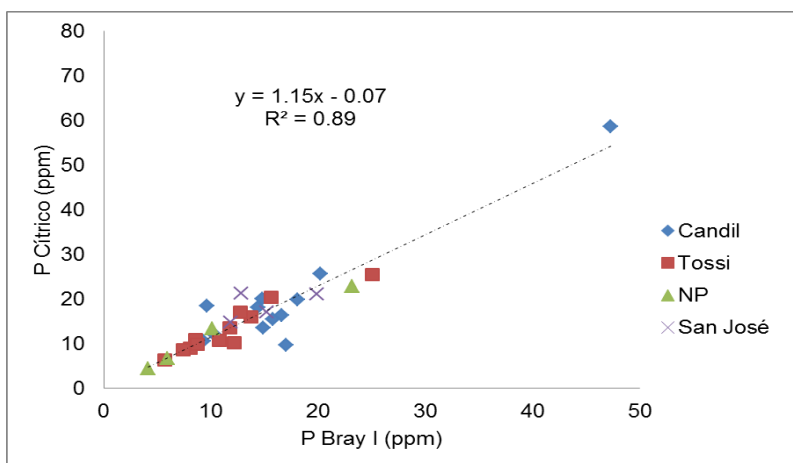


Figura 9. Relación entre el método de estimación de P Cítrico y P Bray I para la profundidad de 0-7,5 cm.

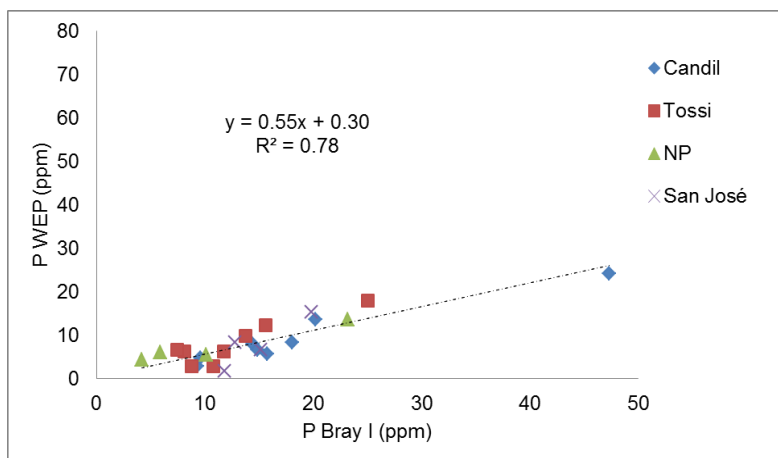


Figura 10. Relación entre el método de estimación de P WEP y P Bray I para la profundidad de 0-7,5 cm.

En la realización de los gráficos de las figuras 8, 9 y 10 se tomaron los datos de todos los sitios, en todas las fechas de muestreo, en todos los tratamientos y en los 3 bloques, para la profundidad de 0-7,5 cm.

En este trabajo, los métodos que presentaron mayor coeficiente de determinación fueron P Mehlich III con P Bray I ($R^2 = 0,93$), coincidiendo con lo descrito por Mallarino (1992, 1995), Cabalceta (1995), Sawyer et al. (1999), Wang et al. (2015), los cuales obtuvieron valores de R^2 de 0,85, 0,90, 0,94, 0,90 y 0,95 respectivamente. Estas altas correlaciones, indicaron que los métodos en cuestión estimarían cantidades proporcionales de P en el suelo. Se debe considerar que el método P Bray I utilizado por autores como Mallarino (1992, 1995), Sawyer et al. (1999), presenta diferente relación suelo: solución (1:10) y tiempo de agitado (5 min.) que el empleado en este trabajo.

La menor correlación se estableció entre P WEP y P Bray I ($R^2 = 0,78$). Esto puede deberse a que el extractante utilizado por el método P WEP es el agua y, por lo tanto, extrae el P más débilmente retenido por el suelo. Por su parte, Wang et al. (2015) determinaron un valor para esta misma relación de $R^2 = 0,61$. Esta diferencia puede deberse a que estos autores realizaron muestreos a 0-20 cm de profundidad, en cambio en nuestro trabajo fue realizado en una profundidad de 0-7,5 cm.

Para el caso de la versión desarrollada en INIA La Estanzuela, del método de P Cítrico no se encontraron datos nacionales ni internacionales para comparar con el valor de $R^2 = 0,89$ determinado.

A modo de ejemplo se realizó la transformación de los valores obtenidos por los diferentes métodos (P Mehlich III, P Cítrico y P WEP) a su equivalente en P Bray I (Cuadro 7). Para dicho cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones obtenidas de la Figuras 8, 9 y 10:

- $Y = 1,55x - 3,77$ (P Bray I a P Mehlich III)
- $Y = 1,15x - 0,07$ (P Bray I a P Cítrico)
- $Y = 0,55x + 0,30$ (P Bray I a P WEP)

Cuadro 7. Estimación de P Bray I a partir de los datos observados y las ecuaciones determinadas en las relaciones de P disponible entre los métodos.

	Observados				Estimados		
	P Bray I	P Mehlich III	P Cítrico	P WEP	P Bray I – P Mehlich III	P Bray I – P Cítrico	P Bray I – P WEP
	4	5	4	2	6	4	3
	6	6	6	3	6	5	5
	6	7	7	3	7	6	5
	7	7	9	3	7	8	5
	8	11	9	4	10	8	7
	9	11	11	5	10	10	8
	9	8	10	6	8	9	9
	9	9	11	6	8	10	10
	10	11	19	6	10	17	11
	10	13	12	6	11	10	11
	10	14	13	6	11	11	11
	11	12	11	7	10	10	11
	12	14	13	7	11	11	11
	12	21	15	7	16	13	11
	12	15	10	8	12	9	14
	13	16	17	8	13	15	14
	13	16	21	8	13	18	15
	14	17	18	10	13	16	17
	14	19	16	12	15	14	21
	15	16	20	14	13	17	24
	15	11	14	14	10	12	25
	15	22	17	15	17	15	27
	16	19	15	18	15	13	32

	16	21	20	24	16	17	43
	17	15	16		12	14	
	17	20	10		15	9	
	18	23	20		17	17	
	20	36	21		26	18	
	20	30	26		22	23	
	23	33	23		24	20	
	25	32	25		23	22	
	47	72	59		49	51	
Prom.	14	18	16	8	14	14	15
Máx.	47	72	59	24	49	51	43
Mín.	4	5	4	2	6	4	3

*Valores obtenidos para la profundidad de 0-7,5 cm

Se resumieron los promedios que se obtuvieron en la estimación de P Bray I a partir de las ecuaciones que se vinculan con P Mehlich III, P Cítrico y P WEP, registrando prácticamente los mismos valores observados y estimados de P Bray I. Por lo tanto, en los suelos estudiados dentro de la cuenca del río Santa Lucía, se podrían utilizar las ecuaciones como forma de calcular la correspondencia con P Bray I, debido a que es el método en el que se realizan las recomendaciones. A su vez, fue P Cítrico el que continuó presentando el valor máximo y P WEP el mínimo. Por otra parte, si bien P WEP es utilizado como un indicador ambiental, su costo para análisis es menor y su correlación (Figura 10) con P Bray I es buena ($R^2=0,78$), por lo tanto, podría implementarse su utilización como método para realizar recomendaciones de dosis (Cuadro 7).

Por su parte, Sawyer y Mallarino (1999), establecen como recomendación que *“la conversión de los resultados de las pruebas de un método a otro no debe hacerse, sino que deben usar las guías de interpretación para cada test”* generando una dicotomía en la utilización de esta herramienta.

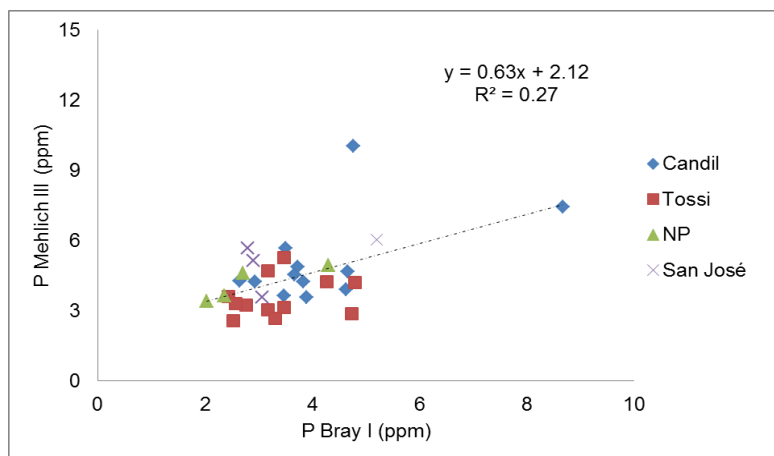


Figura 11. Relación entre dos métodos de estimación de P disponible y P P Mehlich III para la profundidad de 7,5-15 cm.

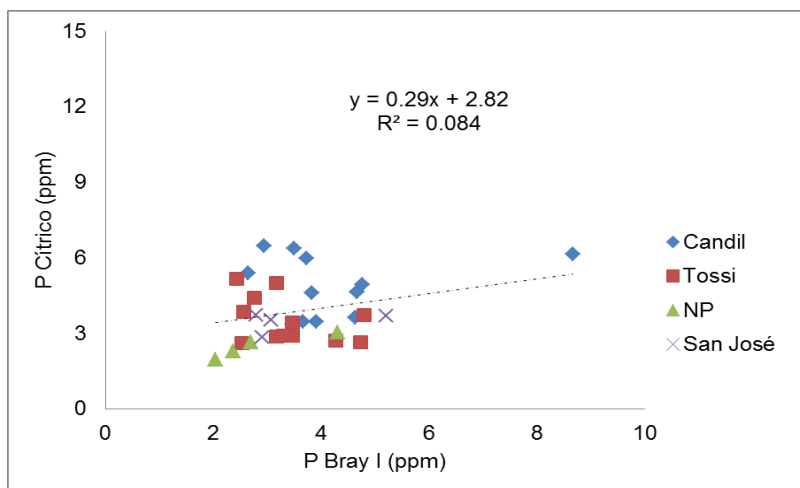


Figura 12. Relación entre el método de estimación de P Cítrico y P Bray I para la profundidad de 7,5-15 cm.

Los resultados encontrados en relación a la profundidad de 7,5 - 15 cm (Figuras 11 y 12), mostraron coeficientes de correlación muy inferiores a los alcanzados en la profundidad de 0-7,5 cm. Esta falta de relación se establecería por la escasa variación de los valores de análisis que se obtuvieron debido a que en esta profundidad el suelo no se habría visto afectado por la fertilización (a diferencia de los primeros 7,5 cm) y, por lo tanto, los valores de P que se determinaron fueron muy próximos a los originales de un suelo prístino y con poca dispersión.

4.2.2 Estimación de los niveles críticos de P para los métodos P Cítrico, P Mehlich III y P WEP

El nivel crítico (NC) se define como el nivel de análisis de suelo por el encima del cual es poco probable que exista respuesta (incremento de rendimiento) a la fertilización. Se expresa en ppm de P.

A modo de ejercicio se estimaron los equivalentes de NC de P (“tentativos”) a partir de los datos de P Bray I para el resto de los métodos de determinación de P (Cuadro 8). Los factores de transformación estimados fueron a partir de un volumen de datos escasos y su validez está comprendida para los suelos de los sitios en estudio. El objetivo es aportar los valores de NC de P de diferentes especies en términos de P Cítrico, P Mehlich III y P WEP para así poder utilizar directamente los datos de análisis de estos métodos para el cálculo de las recomendaciones de fertilización, sin tener que hacer la transformación a P Bray I para poder calcular la dosis necesaria de fertilizante fosfatado a agregar.

Los datos de NC expresados en P Bray I, son los presentados por Perdomo (2015c).

Cuadro 8. Estimación de NC de P (ppm), a partir de datos conocidos en P Bray I, para algunas especies de interés agronómico y el umbral ambiental.

Cultivo/Especie	P Bray I	P Mehlich III	P Cítrico	P WEP
Alfalfa	18	24	21	10
Trébol blanco	16	21	18	9
Trébol rojo	14	18	16	8
Lotus	10 a 12	15	14	7
Soja	10	12	11	6
Maíz	14 a 16	21	18	9
Trigo y cebada	12 a 14	18	16	8
Umbral ambiental	30	43	34	17

Para el cálculo del NC se utilizaron las ecuaciones determinadas en las relaciones de P disponible entre los métodos para la profundidad de 0-7,5 cm (Figuras 8, 9 y 10). Nótese que en los valores donde figuran rangos se consideró el mayor valor.

4.2.3 Estimación del coeficiente de extracción para el modelo de índice de P

A partir de la ecuación obtenida en la Figura 10, se estimó para cada uno de los métodos evaluados, el coeficiente de extracción (CE) el cual corresponde a la pendiente de la regresión lineal que establece el incremento promedio de P disuelto por cada unidad de incremento de P lábil (Soil Test Phosphorus o STP). Este es un parámetro que aporta insumos en la construcción del índice de P debido a que estima la posible pérdida de P en el agua de escurrimiento. Además, hace referencia al P que se encuentra en la solución del suelo y su valor no se multiplica por 100 debido a que se trata de un indicador ambiental.

Klatt et al., Mallarino et al., citados por Mallarino et al. (2002), reportaron para los suelos de Iowa un valor de CE de $0,005 \text{ mg L}^{-1}$ de P disuelto por cada ppm de P Bray I. Valores similares fueron reportados para otras regiones de EEUU por Sharpley, Pote et al., citados por Mallarino et al. (2002). En nuestro trabajo, se encontró un valor de CE de 0,0055, muy similar al citado por estos autores (Figura 10). Cabe señalar que, en nuestro caso, para estimar el CE, los valores de P extraído con agua presentados en la Figura 10 fueron divididos por 100. Esto se debió a que en esta figura el resultado de P WEP fue utilizado como indicador de P lábil (índice de respuesta al agregado de fertilizante fosfatado,) y no como índice ambiental. Cuando el mismo valor de análisis se utiliza, en cambio, como índice ambiental, es usual que se presente sin multiplicarlo por 100. Mediante este cambio, se logra que el valor obtenido de CE sea comparable con los valores reportados por otros autores.

También se determinaron los CE a partir de la regresión lineal entre los datos de P WEP con P Mehlich III y P WEP con P Cítrico, siendo los valores estimados (divididos entre 100) de 0,0034 y 0,0044, respectivamente.

Mallarino et al. (2002), establecieron que el valor de STP correspondió a las muestras tomadas a una profundidad de 0-15 cm para las pruebas de P Bray I y P Mehlich III. En cambio, los valores de CE reportados en este estudio se colectaron a 0-7,5 cm de profundidad. Aunque las profundidades de los estudios fueron distintas, el valor del CE no se vio afectado.

4.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE P PARA RECOMENDACIONES DE FERTILIZACIÓN

De acuerdo a lo observado en los Cuadros 5 y 6 la aplicación de fertilizante en cobertura solo afectó las concentraciones de P asimilable en la capa de 0-7,5 cm de suelo, mientras que estos valores no fueron alterados por la fertilización en la capa de 7,5–15 cm. Por tanto, el muestreo a 0-15 cm reflejaría menos la variabilidad de aporte de P del suelo que la de 0-7,5 cm. Además, el esfuerzo para muestrear el suelo en la primera capa es muy inferior al requerido para sacar una muestra de los primeros 15 cm, por tanto, es más probable que en la práctica se saquen más tomas de los primeros 7,5 cm que de los 15 cm. En base a estas consideraciones, se ha decidido realizar todas las estimaciones de parámetros para recomendar la fertilización en base a sólo los primeros 0-7,5 cm., pero la misma metodología podría ser usada para estimar estos parámetros de 0-15 cm.

4.3.1 Equivalente fertilizante

Con los datos promedios de todos los sitios, fechas y tratamientos de los diferentes métodos de determinación de P lábil evaluados, se confeccionaron las gráficas de respuesta de los niveles de P asimilable al agregado de P_2O_5 (profundidad de 0-7,5 cm) y se obtuvieron los coeficientes de determinación (R^2).

Es importante resaltar que la profundidad a la que se estimó el EF en este trabajo (0-7,5 cm) fue más superficial que la utilizada por Castro et al. (1981b), Baethgen y Pérez (1981) y además, estos autores trabajaban con laboreo convencional, por tanto, los resultados de los EF no son directamente comparables. La razón de trabajar con una profundidad más superficial fue que la variación de P Bray I encontrada fue sólo a esa profundidad, mientras que en la segunda capa (7,5-15) los valores eran relativamente constantes, independientemente del sitio y la fertilización. Por otra parte, el muestreo superficial tiene la ventaja de que es posible sacar un elevado número de tomas por muestra con un menor esfuerzo, lo que incrementa la robustez del resultado. A diferencia de los ensayos previamente citados que evaluaron únicamente respuestas lineales, acá también se evaluaron respuestas exponenciales debido a que como los tiempos de evaluación fueron más cortos que los anuales utilizados por estos autores, la probabilidad de encontrar relaciones exponenciales era mucho mayor.

La estimación del EF se realizó relacionando la dosis de P_2O_5 aplicada al momento de instalar el ensayo con el valor de P Bray I de cada muestreo. La

razón de utilizar como variable X la dosis es que esta es una variable fija. Luego, se estimó el valor de equivalente fertilizante (EF) mediante la inversión de esta función. Si se hubiese utilizado como variable X la concentración de P asimilable, la estimación de EF hubiera sido más directa, pero se podría haber generado un sesgo estadístico, ya que la concentración de P asimilable es una variable aleatoria.

A modo de ejemplo se presenta esta estimación para el sitio Tossi a la profundidad de 0-7,5 cm y en dos fechas de muestreo, 28-05-14 y 23-10-14 (Figuras 13 y 14).

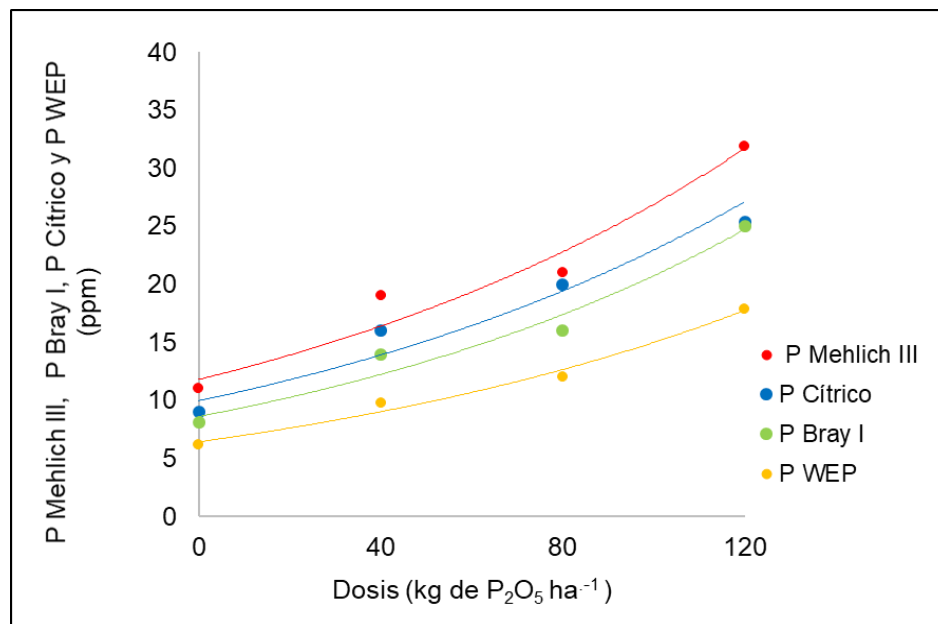


Figura 13. Evaluación de la respuesta del P asimilable al agregado de P_2O_5 para los métodos P Mehlich III, P Bray I, P Cítrico y P WEP (28-05-14).

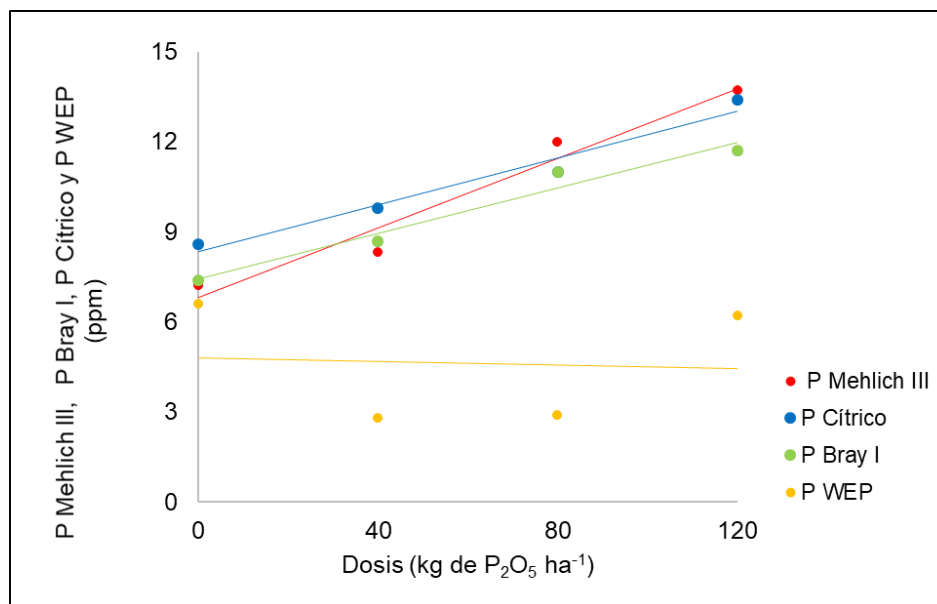


Figura 14. Evaluación de la respuesta del P asimilable al agregado de P₂O₅ para los métodos P Mehlich III, P Bray I, P Cítrico y P WEP (23-10-14).

Las relaciones encontradas entre dosis y valor de P lábil para el gráfico de la Figura 13 fueron: $y=11,80 e^{0,0082x}$ ($R^2=0,94$); $y=9,97 e^{0,0083x}$ ($R^2=0,94$); $y=8,61 e^{0,0088x}$ ($R^2=0,96$) $y=6,4345 e^{0,0085x}$ ($R^2 = 0,981$) para los métodos P Mehlich III, P Cítrico, P Bray I y P WEP, respectivamente. En cambio, las relaciones encontradas para el gráfico de la Figura 14 fueron: $y=0,058x+6,82$ ($R^2=0,96$); $y=0,039x+8,36$ ($R^2=0,97$); $y=0,038x+7,42$ ($R^2=0,96$) $y=-0,0028x + 4,79$ ($R^2=0,0048$) respectivamente. Nótese el cambio de escala del eje en la Figura 14 respecto a la Figura 13.

El cálculo del EF se realizó asumiendo dos tipos de respuesta de los métodos de estimación de P disponible al agregado de P: lineal ($y=a+bx$) y exponencial ($y=a^{bx}$) (Cuadro 9). Normalmente se asume una respuesta del tipo lineal (igual pendiente para todo el rango de fósforo en el suelo). Pero en realidad, la pendiente varía con el nivel de fósforo en el suelo, lo cual resultaría en una relación exponencial, ya que el aumento de las primeras partes por millón implicaría mayor gasto de fertilizante que las últimas.

Se determinaron con estas dos funciones los valores de EF para cada sitio, fecha, tratamiento y bloque (Cuadro 10). Cuando se trabajó con la ecuación exponencial, el EF se estimó para cada dosis de P₂O₅ y luego se computó el promedio de esos valores, mientras que cuando se utilizó la ecuación lineal, se obtuvo un sólo valor de EF. Esto se debe a que en la ecuación lineal la pendiente es constante. Por ejemplo, para la ecuación lineal

la estimación del EF para Tossi en la dosis de 40 kg de P_2O_5 , en la fecha 23-10-14, con un $b=0,038$, fue: $1/0,038 = 26,32 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 (Figura 14). Este valor debería ser agregado para incrementar en una parte por millón (ppm) el valor de P Bray I. Si esta estimación se realizara con una dosis de 80 kg de P_2O_5 , el resultado sería idéntico.

En cambio, el resultado de realizar estas estimaciones de EF con una ecuación exponencial variaría con las dosis agregadas. Para obtener el EF, se debe encontrar la inversa de la derivada de la función exponencial. A modo de ejemplo, los resultados para dos dosis (40 y 80 kg ha^{-1} de P_2O_5), para el sitio Tossi en la fecha 28-05-14 y para el método P Bray I, variaron entre sí. En la dosis de 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 , con valores de $a= 8,61$ y $b= 0,0088$, el cálculo de EF fue: $1 / [8,61 \cdot 0,0088^{(0,0088 \cdot 40)}] = 9,28 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 por ppm de P Bray I (Figura 13). Si realizamos este mismo cálculo para la dosis de 80 kg ha^{-1} de P_2O_5 , obtendríamos un valor de EF de 6,53, evidenciando nuevamente que cuesta más incrementar las primeras unidades de P que las últimas debido a al aumentar la dosis los mecanismos de retención del P del suelo se van saturando.

Como se representa en la Figura 15, graficando el inverso de la función de respuesta de P lábil al agregado de fertilizante soluble, se puede obtener directamente el EF a partir del valor de la pendiente en el punto donde la curva tangente se une con la función.

Cuadro 9. Estimación del EF a partir de función lineal y exponencial.

Ecuación	Fórmula = y	Derivada = y'	Equivalente Fertilizante = $1/y'$
Lineal	$a + bx$	b	$\frac{1}{b}$
Exponencial	$a e^{bx}$	$ab e^{bx}$	$\frac{1}{ab e^{bx}}$

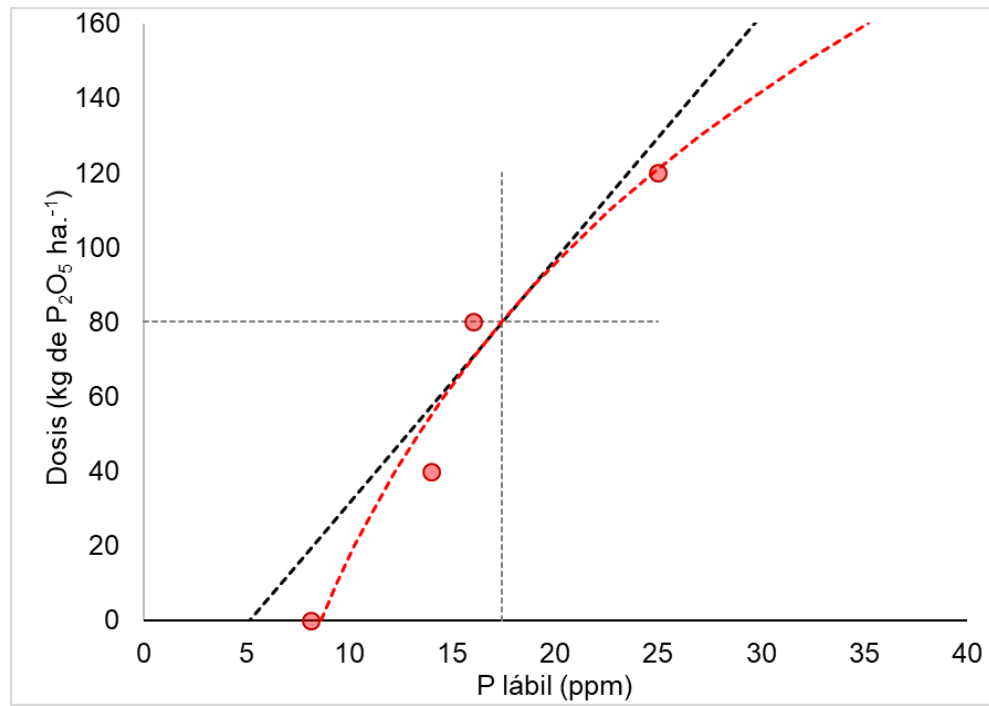


Figura 15. Representación gráfica del EF para la función exponencial en el sitio Tossi, dosis 80 kg ha.⁻¹ en la fecha 28-05-14.

Cuadro 10. Equivalente fertilizante (EF) estimado a partir de la función lineal, exponencial y R^2 para cada sitio y en los 4 métodos evaluados, considerando los días desde la fertilización.

Días desde la fertilización	Sitio	Tipos de función	Dosis	P Bray I		P Mehlich III		P Cítrico		P WEP	
				EF	R^{2II}	EF	R^2	EF	R^2	EF	R^2
54	Tossi	Lineal	NC ^I	7,60	0,93	6,22	0,58	7,49	0,99	10,72	0,96
		Exponencial	0	13,20	0,96	10,33	0,53	12,08	0,94	18,28	0,98
			40	9,28		7,44		8,67		13,01	
			80	6,53		5,36		6,22		9,26	
			120	4,59		3,86		4,46		6,59	
			Prom.	8,40		6,75		7,86		11,79	
56	Candil	Lineal	NC	3,96	0,75	2,32	0,80	3,14	0,75	7,36	0,86
		Exponencial	0	8,45	0,84	5,75	0,92	6,88	0,83	15,14	0,91
			40	5,85		3,60		4,71		10,31	
			80	4,05		2,25		3,23		7,02	
			120	2,80		1,41		2,21		4,78	
			Prom.	5,29		3,25		4,26		9,31	
63	San José	Lineal	NC	15,17	0,91	7,66	0,58	27,17	0,37	10,28	0,81
		Exponencial	0	20,61	0,94	11,98	0,53	29,31	0,39	26,33	0,79
			40	17,36		9,83		26,93		14,16	
			80	14,62		8,07		24,74		7,62	
			120	12,31		6,63		22,73		4,10	
			Prom.	16,22		9,13		25,93		13,05	
93	NP	Lineal	NC	6,53	0,85	4,46	0,84	6,47	0,93	14,49	0,70
		Exponencial	0	19,09	0,97	14,15	0,96	17,0	0,99	29,61	0,75
			40	10,79		7,72		9,73		21,16	
			80	6,09		4,21		5,52		15,12	
			120	3,44		2,29		3,14		10,81	
			Prom.	9,85		7,09		8,88		19,18	

132	Candil	Lineal	NC	22,17	0,59	17,27	0,98	10,08	0,99	Sin datos (no se realizaron análisis de suelo en esta fecha).	
		Exponencial	0	24,95	0,60	21,85	0,99	12,89	0,98		
			40	21,77		18,87		10,00			
			80	18,99		16,29		7,75			
			120	16,57		14,07		6,01			
			Prom.	20,57		17,77		9,16			
137	Tossi	Lineal	NC	16,05	0,94	11,44	0,92	12,82	0,84	Sin datos (no se realizaron análisis de suelo en esta fecha).	
		Exponencial	0	23,39	0,98	17,58	0,87	20,45	0,86		
			40	17,70		12,55		15,29			
			80	13,40		8,96		11,43			
			120	10,14		6,40		8,54			
			Prom.	16,16		11,37		13,93			
202	Tossi ^{III}	Lineal	NC	26,32	0,96	17,24	0,96	25,64	0,97	0	0,0048
		Exponencial	0	33,48	0,96	25,08	0,96	33,21	0,99	0	0,0018
			40	28,55		20,01		28,80		0	
			80	24,34		15,96		24,98		0	
			120	20,75		12,74		21,67		0	
			Prom.	26,78		18,45		27,17		0	
204	Candil	Lineal	NC	16,21	0,87	13,62	0,78	40,32	0,15	40	0,67
		Exponencial	0	22,28	0,87	21,12	0,84	37,76	0,21	51,49	0,71
			40	18,21		16,86		34,68		40,83	
			80	14,87		13,45		31,86		32,38	
			120	12,15		10,74		29,26		25,67	
			Prom.	16,88		15,54		33,39		37,59	

^I NC= El Equivalente Fertilizante (EF) es el mismo para todas las dosis debido a que la pendiente del modelo lineal es una constante.

^{II} R²= El valor de R² de la fila NC corresponde al modelo lineal, mientras que el valor asignado a las dosis es el R² del modelo exponencial.

^{III} En Tossi para el método P WEP los valores figuran en 0 debido a que dan negativos en ambas funciones (lineal y exponencial), en todas las dosis y en el promedio, -357,14; -572,32; -581,55; -590,93; -600,46 y -586,31, respectivamente.

¥ Datos evaluados en la profundidad de 0-7,5 cm.

En el sitio Tossi, se partió de valores de análisis de P en el suelo superiores a NP e inferiores a Candil, y los niveles de P lábil se fueron incrementando a medida que se aumentó la dosis de P_2O_5 . Por otra parte, con el transcurso del tiempo, la relación encontrada entre el P determinado por los distintos métodos de estimación de P disponible y la dosis de P_2O_5 tendió hacerse lineal debido a que el P se fue fijando al suelo constituyendo fracciones menos disponibles para los vegetales (Figuras 13 y 14).

De todos modos, en el rango de fechas evaluado, la estimación del EF se ajustó mejor a una relación exponencial que a una lineal, en todos los sitios y métodos de estimación de P disponible, dado que los valores de R^2 exponencial fueron iguales o mayores que los de la respuesta lineal (Cuadro 10). A excepción de Candil en la fecha 12-08-14 y Tossi el 28-05-14 para el método P Cítrico y en el sitio San José y Tossi en su segunda fecha de muestreo, 19-08-14, para el método P Mehlich III).

Por otra parte, independientemente del método y de la fecha de muestreo, con el agregado de mayores dosis de P_2O_5 , el nivel de fósforo necesario para aumentar una parte por millón de P en el suelo, fue siempre menor.

A su vez, tomando los datos promedio, se notó un aumento en los valores de EF a medida que transcurrió el tiempo desde la fertilización. Esto podría deberse a la disminución del nivel de P en el suelo, dada la extracción de éste por parte de la pradera y la retención que realiza el suelo al fijar el P (Cuadro 10).

4.3.2 Tasa de descenso

Para el cálculo de las tasas de descenso (TD) se utilizó el siguiente modelo de caída de P disponible en función del tiempo desde la fertilización.

$$y = e^{-cx} (b e^{cx} + m - b) \quad [1]$$

Donde:

Y = Valor de P lábil a tiempo x

b = Valor de P lábil en equilibrio cuando el tiempo tiende a infinito

m = Valor de P lábil a tiempo cero

c = Coeficiente de fijación de P

x = Tiempo

El modelo descrito es el inverso de la función de Mitscherlich y ha sido utilizado por Cox et al., citados por Black (1993)

Se aplicó este modelo para los sitios Candil y Tossi debido a que fueron éstos los que contaron con tres fechas de muestreo (Figuras 16 y 17). Además, para el ajuste del modelo se utilizó la herramienta de análisis Solver incluida en el paquete de Microsoft Office 2010. Se consideró solo la profundidad de suelo de 0 - 7,5 cm.

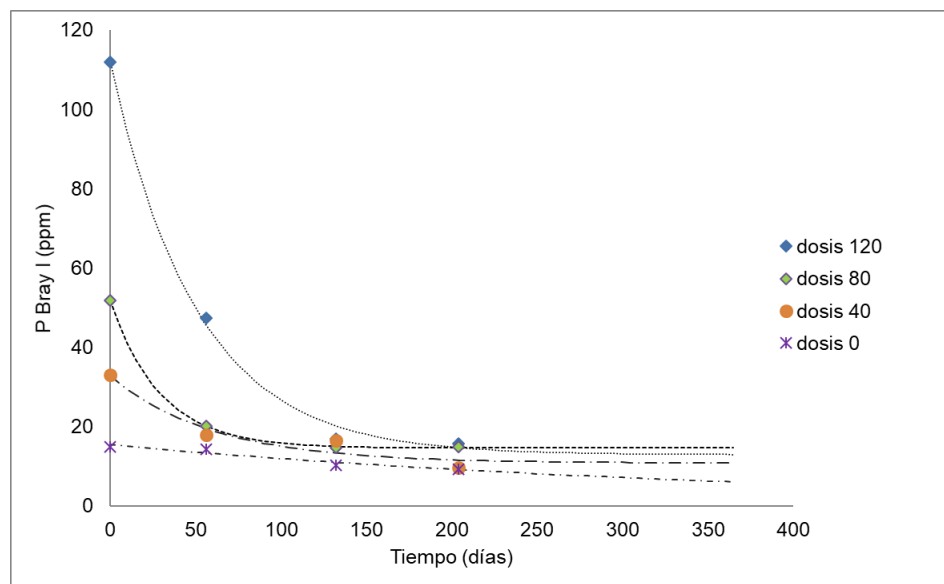


Figura 16. Tasa de descenso para el sitio Candil

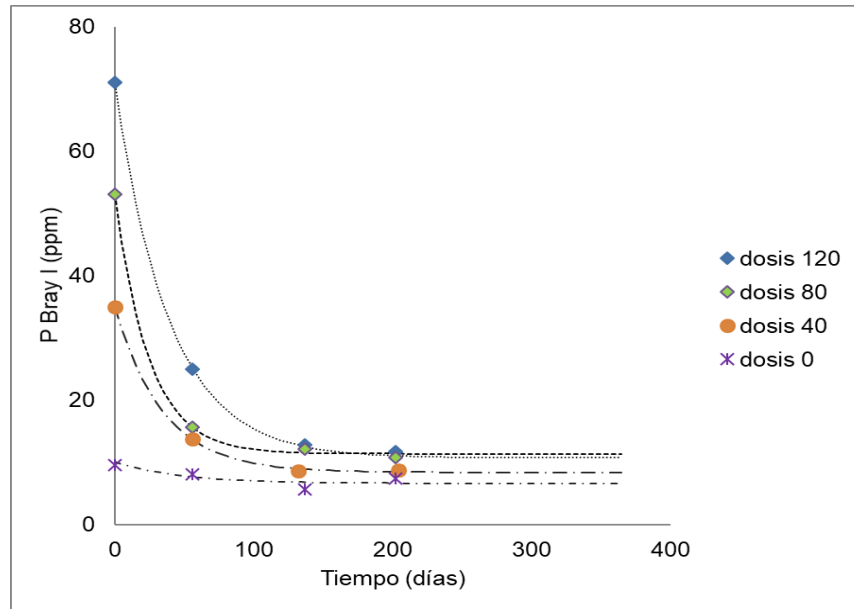


Figura 17. Tasa de descenso para el sitio Tossi

El valor de P Bray I a tiempo 0 (inmediatamente después de la fertilización) se obtuvo teóricamente, debido a que no tiene sentido muestrear en ese momento. Este valor, se obtuvo considerando el volumen de suelo de $750 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y una densidad aparente (DAP) del suelo de $1,25 \text{ ton/m}^3$, con la que se calculó una masa de $937,5 \text{ ton ha}^{-1}$. Por lo tanto, si se fertilizara con $120 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, estaríamos agregando $52,37 \text{ kg de P ha}^{-1}$ ($120 \times 0,4364$), que al expresarlo en ppm y para la masa que se calculó son $56 \text{ ppm de P Bray I}$ lo que se eleva al valor inicial del suelo.

A partir de las gráficas de TD presentadas en las Figuras 16 y 17 se determinó que la tendencia de caída de P en el suelo en el tiempo fue similar en ambos sitios, aunque más pronunciada en Tossi (Figura 17) que en Candil (Figura 16). Además, la TD en ambos sitios fue mayor para las dosis de fertilizante más elevadas (Figuras 16 y 17)

En general, para todas las dosis los niveles de P cayeron hasta llegar a un punto de equilibrio, que estuvo un poco por encima del nivel del que se partió previo a la fertilización (Figuras 16 y 17). Ese punto de equilibrio se correspondió con el valor de b de la ecuación [1]. Por otra parte, los niveles de P Bray I, al final del ensayo fueron similares a ese nivel de equilibrio, por lo cual la tasa de caída durante de ese período fue cercana al 100%. Además, los

valores b para cada dosis tendieron a aumentar con la dosis excepto para la dosis de 80 kg de P_2O_5 ha^{-1} , donde en los dos sitios, la tendencia fue a permanecer con valores de equilibrio mayores a la de 120 kg, lo cual se debió a un error de muestreo u otro error no identificado.

Por otra parte, si la TD se estima con respecto al valor b de la dosis 0, en el tiempo evaluado (aproximadamente 200 días), las TD en el sitio Tossi fue menor al 100% y de 100% en Candil (Cuadro 11).

Como se mencionó en la revisión, Castro et al. (1981a) encontraron una TD entre 28 y 50% para los suelos de Uruguay. Por otra parte, Baethgen y Pérez (1981), reportan una TD promedio de 31,7% (sobre un suelo del tipo Brunosol eútrico lúvico de la Unidad Kiyú) y Lattanzi et al. (2016), en un sitio de estudio en Florida (Brunosoles subeútricos), definen una TD de 48%. Todos estos autores mencionados realizaron el cálculo para P Bray I, encontrándose éstas TD por debajo de los valores determinados en este trabajo. De todas maneras, estos autores no determinaron las TD con el mismo modelo que el utilizado en este trabajo, lo cual puede generar diferencias sobre todo a la estimación del punto inicial del P Bray I en el suelo. Lattanzi et al. (2016), además, no especificaron el tiempo al que determinaron la TD ni la base del cálculo.

Para obtener la ecuación de cálculo de TD se partió de la derivada de la ecuación [1] con respecto al tiempo (x). El resultado de esta derivada es:

$$dy/dx = -c(y - b) \quad [2]$$

Luego, la TD se obtiene restándole al valor de la derivada a un tiempo dado de agregado del fertilizante (cuando el valor de P lábil es igual a y) el valor de la derivada al momento cero (cuando el valor de P lábil es igual a m), y luego dividiendo esa diferencia sobre el valor de la derivada al momento cero Ec. [3] a [4]. Finalmente, al eliminar los factores comunes de la ecuación [4] se obtiene la ecuación final de TD [5] que representa la caída de P lábil observada en cierto período de tiempo con respecto a la caída máxima o potencial.

$$TD = \frac{-c((y - b) - (-c(m - b)))}{c(m - b)} \quad [3]$$

$$TD = \frac{-c(y-b)-(m-b)}{c(m-b)} \quad [4]$$

$$TD = \frac{(y-m)}{(m-b)} * 100 \quad [5]$$

Cuadro 11. Valores de tasa de descenso (%) en los sitios Candil y Tossi para las dosis de 40, 80 y 120 kg de P₂O₅ ha⁻¹.

Dosis (kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Candil				Tossi			
	A punto de equilibrio		A nivel original		A punto de equilibrio		A nivel original	
	204 días	365 días	204 días	365 días	202 días	365 días	202 días	365 días
40	99	100	100	100	99	100	93	95
80	99	99	100	100	100	100	91	91
120	97	100	99	100	98	100	92	93

Los valores de TD se obtuvieron con respecto al valor b estimado con el modelo de TD de cada dosis (40, 80 y 120 kg de P₂O₅ ha⁻¹) y también con respecto al valor de equilibrio del suelo estimado a partir de la dosis 0. La estimación de ese valor de equilibrio para la dosis 0 vario entre sitios. En el caso del sitio Tossi, ese valor se estimó del modelo de TD debido a que se observaba una leve caída del valor de P Bray I con el tiempo. En caso de Candil, en cambio, para la dosis 0 no se ajustó el modelo debido a que el P Bray I de esa dosis, no cambio apreciablemente durante los muestreos en las distintas fechas, por lo cual se utilizó el valor promedio para representar ese valor de equilibrio.

Se calculó la TD a 202 y 204 días desde la fertilización para Tossi y Candil respectivamente, a partir de los datos observados de P Bray I. En cambio, para el cálculo de la TD anual (365 días) se usaron los valores de P Bray I estimados por el modelo. Nótese que ambas tasas fueron similares, por lo cual la caída de P luego de los 202 o 204 día no fue importante.

Observando los valores del Cuadro 11 en detalle, a pesar de encontrar esa tendencia general similar mencionada anteriormente, existieron casos específicos donde la misma no se manifestó. Por ejemplo, para la dosis 80 P_2O_5 ha⁻¹ en el sitio Tossi y en Candil, se observó que los valores de TD fueron iguales a los 202 y 204 días, respectivamente que a los 365 días. Esto pudo deberse a errores analíticos en el laboratorio o a la variabilidad espacial de la concentración de P lábil en el suelo. En estos casos, se puede afirmar que no hubo un error analítico, ya que se repitieron los análisis, pero los resultados se mantuvieron.

Datos sin publicar de Perdomo², muestran que en estos ensayos la extracción de P resultado del corte de forraje de praderas mezclas fue del 20% de la dosis agregada, por tanto, si no hubiera existido extracción las TD podrían haber sido menores.

4.3.3 Ejemplo de cálculo de la dosis de P_2O_5 a agregar

Se realizó un ejercicio aplicable a la práctica de fertilización, en donde se estimó para el sitio Candil las dosis a agregar de P_2O_5 comparando modelos de estimación lineal y exponencial (Figuras 18 y 19).

Se tomó para este ejemplo, el nivel crítico del *Trifolium repens* (trébol blanco) que es de 16 ppm, dado que es la especie que presenta mayor requerimiento de P en la mezcla forrajera instalada en este sitio. Además, este ejercicio se realizó solo para el método P Bray I y para dos fechas contrastantes (28-05-14 y 23-10-14). En la primera fecha de muestreo, las correlaciones entre las dosis estimadas de P_2O_5 a agregar y el nivel de P Bray I para los diferentes modelos fueron distintas ($R^2= 0,84$ y $0,75$, exponencial y lineal respectivamente) (Figura 17), mientras que, en la segunda fecha, fueron iguales ($R^2=0.87$) en ambos modelos (Figura 18).

La fórmula para estimar la dosis óptima, o sea la dosis necesaria para incrementar la concentración de P Bray I del suelo desde el nivel actual hasta el nivel crítico varía según el modelo (Cuadro 12).

² Perdomo, C. 2017. Com. personal.

Cuadro 12. Fórmulas de estimación de dosis óptima. Se incluye el procedimiento de despeje para su estimación.

Modelos	
Lineal	Exponencial
Ecuaciones generales	
$y = a + bx$	$y = a e^{b \cdot x}$
Despejes	
$PBd = PB_0 + b \cdot \text{dosis}$	$PBd = PB_0 e^{(b \cdot \text{dosis})}$
$b \cdot \text{dosis} = PBd - PB_0$	$\ln(PBd) = \ln(PB_0) + (b \cdot \text{dosis} \cdot \ln e)$
	$\ln(PBd) = \ln(PB_0) + (b \cdot \text{dosis} \cdot 1)$
	$b \cdot \text{dosis} = \ln PBd - \ln PB_0$
	$b \cdot \text{dosis} = \ln \left[\frac{PBd}{PB_0} \right]$
$\text{dosis} = \frac{(PBd - PB_0)}{b}$	$\text{dosis} = \frac{\left[\ln \left(\frac{PBd}{PB_0} \right) \right]}{b}$

PBd= Nivel objetivo (Nivel Crítico) asociado a la aplicación de una dosis de fertilizantes.

PB₀= Nivel inicial de análisis de suelo

Ln= Logaritmo neperiano

Dosis= Dosis óptima

b= coeficiente de la función lineal o exponencial

La estimación de la dosis optima se realizó en función de los niveles de P Bray I inicial y objetivo (nivel crítico) para las funciones lineal y exponencial.

Estas dosis óptimas de P_2O_5 se estimaron utilizando el mismo nivel crítico (Figura 15 y 16).

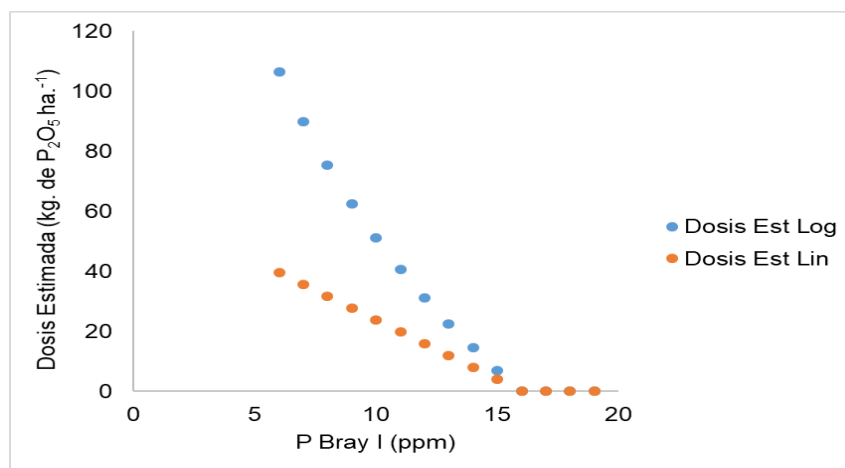


Figura 18. Dosis de P_2O_5 a agregar para llegar al NC comparando modelos de calculo que utilizan un EF lineal y otro exponencial en el sitio Candil (28-05-14).

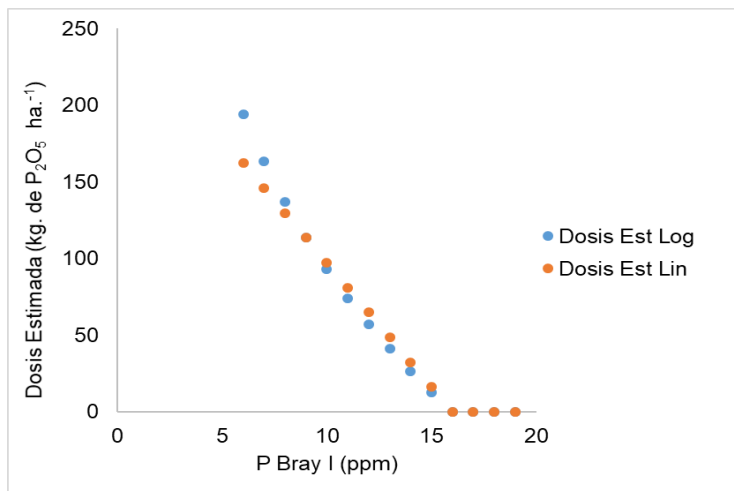


Figura 19. Dosis de P_2O_5 a agregar para llegar al NC comparando modelos de calculo que utilizan un EF lineal y otro exponencial en el sitio Candil (23-10-14).

Cuando los R^2 fueron distintos, se observó una clara diferencia en la recomendación de fertilizante a agregar y esta diferencia fue mayor cuando el valor de análisis de suelo actual estuvo más alejado del nivel crítico (NC) (Figura 18). En números, si el valor de NA de P Bray I fuera de 6 ppm, para llevarlo a los 16 del NC, se debería agregar 107 y 40 kg de P_2O_5 para los modelos exponencial y lineal respectivamente. Por otra parte, a medida que el nivel de P en el suelo se acercó al nivel crítico, las diferencias se hicieron cada vez menores.

En cambio, en el ejemplo donde los R^2 de la estimación de ambos modelos fueron iguales, no se apreciaron grandes diferencias en el cálculo de la recomendación de dosis con ambos modelos (Figura 19).

Como se describió en los párrafos anteriores, teóricamente el modelo que más se ajustaría a los procesos que ocurren en el suelo sería el exponencial, aunque para poder establecer con mayor precisión esta conclusión serían necesarios mayor cantidad de muestreos con menores intervalos de tiempo.

Cuadro 13. Dosis óptimas estimadas para los modelos lineal y exponencial en base a los valores de P lábil determinados por 4 métodos.

Modo de Cálculo	Sitio	P lábil en el testigo*				Modelo lineal				Modelo exponencial			
		PBI	PMIII	PC	PW	PBI	PMIII	PC	PW	PBI	PMIII	PC	PW
		P (ppm)				kg P ₂ O ₅ ha. ⁻¹							
Original**	Tossi	8	11	9	6	60	62	67	30	77	79	84	44
	Candil	14	17	18	8	8	9	0	7	14	19	0	12
	San José	12	21	15	2	61	0	82	74	70	0	91	104
	NP	4	5	4	4	78	70	88	68	95	89	101	88
P Bray I***	Tossi	8	11	8	11	60	39	62	38	77	44	80	43
	Candil	14	15	16	14	8	5	1	7	14	9	2	12
	San José	12	17	13	3	61	0 (-20)	44	198	70	0 (-19)	49	411
	NP	4	7	4	8	78	57	79	55	95	55	99	53

*=PBI: P Bray I; PMIII: P Mehlich III; PC: P Cítrico; PW: P WEP

**= Valores de P lábil y equivalente fertilizante de cada método, y nivel crítico de P Bray I para trébol blanco (16 ppm) transformado a los valores de los otros métodos.

***= Valores de los demás métodos transformados a P Bray I, y valores de equivalente fertilizante y nivel crítico de P Bray I de cada sitio.

Los valores de P lábil fueron determinados en el testigo sin fertilizar a los 54, 56, 63 y 93 días post-fertilización para los sitios Tossi, Candil, San José y NP, respectivamente. Las dosis óptimas se estimaron tanto para los valores de P lábil de cada método como para los de P Mehlich III, P Cítrico y P WEP transformados a P Bray I en base a las relaciones encontradas entre ellos.

Se contrastaron 2 formas de cálculo de la dosis ($\text{Kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$). La primera en base a los valores observados de P lábil para los diferentes métodos, con sus respectivos niveles críticos calculados a partir de la transformación del NC de P Bray I y con el EF calculado para cada método y sitio. La segunda fue a partir de las transformaciones de los valores de cada método de análisis a su equivalente en P Bray I y usando el EF de P Bray I en cada sitio y el NC de trébol blanco para P Bray I (Cuadro 13).

Las dosis estimadas dentro de cada modelo (lineal o exponencial) y método de cálculo fueron similares (dentro de un rango de 20 kg/ha de P_2O_5), excepto en el sitio San José (Cuadro 13) y las mayores diferencias se observaron entre P Bray I y P Mehlich III. En la Figura 8, se aprecia como los puntos que relacionan ambos métodos de determinación de P lábil para el sitio San José quedan por encima de la recta de regresión que se ajustó, coincidiendo con lo comentado por Del Pino y Zamalvide³, quienes encontraron que en suelos superficiales sobre cristalino estos métodos se comportan diferente. Además, al comparar los R^2 entre P Mehlich III y P Bray I para cada sitio (Candil, NP, San José y Tossi) en las primeras fechas de muestreo, los R^2 determinados fueron 0,995, 0,999, 0,86 y 0,997, respectivamente, reforzando los indicios de que estos métodos se comportan de forma diferente en el sitio San José.

Dado que el P Bray I es el método más utilizado actualmente en Uruguay y del que existen estimaciones de NC, se compararon, a partir de los valores de P lábil observados, las dosis estimadas con los demás métodos en relación con P Bray I. Para el modelo lineal, las diferencias máximas oscilaron entre -61 y 21 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Cuando se eliminó el Sitio San José los valores promedios de las diferencias con respecto a P Bray I descendieron, y para los métodos P Mehlich III, P Cítrico y P WEP éstas fueron de -2, 3 y -13 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ respectivamente.

En cuando al modelo exponencial, estas diferencias máximas fueron de -70 y 34 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, mientras que cuando se eliminó el Sitio San José los promedios por método fueron 0, -1 y -14 para P Mehlich III, P Cítrico y P WEP, respectivamente. Por tanto, en ambos modelos cuando se eliminó de la

³ Del Pino, A.; Zamalvide, J. 2018. Com. personal.

comparación al Sitio San José el método que presentó la mayor diferencia con P Bray I fue P WEP. En estos 3 sitios, los métodos P Mehlich III y P Cítrico, en cambio, estimaron dosis muy similares a las de P Bray I.

Cuando se usaron los valores transformados a P Bray I, las diferencias observadas entre métodos fueron mayores, pero las tendencias generales se mantuvieron.

Cuando se compararon los resultados de estas estimaciones entre modelos para un mismo método de cálculo, se observó que, de acuerdo con lo esperado, el modelo exponencial estimó mayores dosis que el lineal. Esta tendencia se observó tanto para los valores observados como para las transformaciones a P Bray I de los demás métodos. Cuando se usaron los valores observados las diferencias promedio sin el Sitio San José (estimadas a partir del Cuadro 13) variaron entre 9 a 14 Kg P_2O_5 ha⁻¹. Cuando se usaron en cambio los valores de los demás métodos transformados a P Bray I, las diferencias promedio entre modelos disminuyeron y fluctuaron entre 2 a 14 Kg P_2O_5 ha⁻¹. Por tanto, estas diferencias no fueron importantes desde el punto de vista práctico, considerando que las recomendaciones de fertilización tienden a darse dentro de un rango y no como un valor fijo. De todos modos, como se evidencia en las Figuras 18 y 19, cuanto menor sea el nivel de P lábil del suelo, mayores van a ser las diferencias entre las dosis estimadas con el modelo exponencial y el lineal. Como la mayoría de los sitios bajo uso agropecuario de la cuenca del río Santa Lucía tiene valores de P lábil por encima de los originales, es de esperar que las diferencias entre los 2 modelos de cálculo no sean tan grandes.

Otra estimación más cercana a la realidad agropecuaria es utilizar un valor único de EF para todos los sitios, ya que generalmente no se cuenta con el valor exacto de cada sitio. En este trabajo, se estimaron también las dosis usando un valor único de EF (6 kg/ha P_2O_5 /ppm), que fue el promedio de los estimados con el modelo lineal para la primera fecha de muestro de 3 de los sitios (exceptuando San José). Utilizando los valores transformados a P Bray I de los demás métodos y el NC del trébol blanco, se observó que en relación con usar un valor variable de EF (Cuadro 13), la tendencia fue que los valores de dosis a agregar disminuyeron (Cuadro 14).

El sitio en el cual se observó mayor disminución de la dosis fue San José debido a que este sitio fija más P y, por lo tanto, presenta un EF mayor (10,3 kg/ha P_2O_5 /ppm) cuando calculamos específicamente el del sitio. De esta manera, al establecer un valor de 6 kg/ha P_2O_5 /ppm, la recomendación disminuyó de 198 a 78 kg/ha P_2O_5 /ppm para el P WEP.

Cuadro 14. Valores de dosis óptima estimada para cada sitio y métodos de determinación de P asimilable.

Sitio	P Bray I	P Mehlich III	P Cítrico	P WEP	P Bray I*
Tossi	48	30	48	30	77
Candil	12	6	0	12	14
San José	24	0 (-6)	18	78	70
NP	72	54	72	48	95

*P Bray I= Valores de P Bray I calculados utilizando el modelo exponencial a partir de los datos observados.

Las dosis óptimas estimadas fueron en base a los valores de P disponible de los demás métodos transformados a P Bray I, con valores de EF y NC fijos (6 kg/ha P_2O_5 /ppm y 16 ppm, respectivamente) para el modelo lineal (Cuadro 14).

Al considerar todos los sitios, en Candil fue en el que se estimó menores valores de dosis, debido a que en el promedio para todos los métodos y tratamientos fue el que presentó mayores valores de análisis de P lábil en suelo. Para este sitio, la dosis estimada a partir del modelo lineal aumentó cuando el cálculo se hizo con el EF fijo (Cuadro 14) respecto al calculado con el EF a partir de los datos observados (Cuadro 13).

Los valores de dosis óptima determinados fueron similares entre sí, pero inferiores al “mejor método” que sería el uso de P Bray I con modelo exponencial. Este resultado estaría de acuerdo a lo esperado, ya que el método exponencial estima dosis mayores que el lineal (Cuadro 14). Esto indicaría que quizás la mejor alternativa sería utilizar una función promedio exponencial que relacione los incrementos de P Bray I con respecto al testigo con la dosis.

En el sitio San José, los cambios en recomendación de dosis por método respecto al modelo lineal entre los datos observados y utilizando el EF fijo variaron en el orden del 5, 250 y 450 % menor, para P WEP, P Bray I y P Mehlich III respectivamente (Cuadros 13 y 14).

En los sitios Tossi y NP la dosis bajó con respecto a la calculada con el EF a partir de los datos observados (Cuadros 13 y 14).

A pesar de evidenciar un cambio en las estimaciones de dosis en los sitios (excepto San José), éste no fue de gran magnitud, ya que para el caso de

Candil el aumento fue como máximo de 5 kg de P_2O_5 ha.⁻¹ y para Tossi y NP la disminución fue máximo 12 kg de P_2O_5 ha.⁻¹. Estos valores en términos agronómicos no son significativos.

Al realizar la comparación de diferentes métodos entre sí, P Bray I y P Cítrico al igual que P Mehlich III y P WEP estimaron dosis similares entre ellos para los sitios Tossi y NP.

5. CONCLUSIONES

Para los distintos métodos de determinación de P lábil, se encontró que hubo un aumento del nivel de P lábil en el suelo asociado al agregado de P y que existieron diferencias entre agregado y no agregado de P, independientemente de la dosis, para la profundidad de 0-7,5 cm (p-valor $\leq 0,05$).

Se observó mayor concentración de P lábil en la profundidad de 0-7,5 que en la de 7,5-15 cm, lo cual sería esperable al tratarse de un nutriente no móvil en un sistema con siembra directa, en el cual el P se agrega en superficie y no hay inversión posterior ni mezclado del horizonte superficial. De todas formas, se visualiza en algunos casos, mayores niveles de P en profundidad cuando fueron aplicadas dosis mayores de P_2O_5 , aunque sin observar una tendencia clara.

Para los suelos en estudio, los valores obtenidos de P disponible (ppm) en la profundidad de 0-7,5 cm, siguieron en todos los sitios la secuencia: P Mehlich III > P Cítrico > P Bray I > P WEP.

En líneas generales, para la profundidad de 0-7,5 cm, el método que mejor se relacionó con P Bray I fue P Mehlich III, independientemente de la fecha, con un $R^2=0,93$. Mientras que para P Cítrico y P WEP los R^2 fueron de 0,89 y 0,78 respectivamente. Estas altas correlaciones, indicaron que los métodos en cuestión estimarían cantidades proporcionales de P en el suelo. La menor correlación se estableció entre P WEP y P Bray I, lo cual puede deberse a que el extractante utilizado por el método P WEP es el agua y, por lo tanto, extrae el P más débilmente retenido por el suelo. Si bien P WEP es utilizado como un indicador ambiental, su costo para análisis es menor y su correlación con P Bray I es buena, por lo tanto, podría implementarse su utilización como método para realizar recomendaciones de dosis.

Para la profundidad de 7,5 - 15 cm, las relaciones de los diferentes métodos con P Bray I mostraron R^2 muy inferiores a los alcanzados en la profundidad de 0-7,5 cm. Esta falta de relación se establecería por la escasa variación de los valores de análisis que se obtuvieron debido a que en esta profundidad el suelo no se habría visto afectado por la fertilización.

Las relaciones observadas para el rango de sitios estudiados entre los diferentes métodos (eje y) con P Bray I (eje x), fueron las siguientes:

$$Y = 1,55x - 3,77 \text{ (Y=P Mehlich III)}$$

$$Y = 1,15x - 0,07 \text{ (Y= P Cítrico)}$$

$$Y = 0,55x + 0,30 \text{ (Y= P WEP)}$$

A partir de estas relaciones entre los diferentes métodos, se despejaron las ecuaciones para transformar los valores de cada método a su equivalente en P Bray I. Estas relaciones son válidas para los suelos estudiados dentro de la cuenca del Río Santa Lucía, en caso de pretender aplicarlas en otras zonas, deberían ser previamente verificadas.

Independientemente del método de extracción, el valor del P disponible para los diferentes sitios fue mayor en Candil con respecto al resto, aún sin fertilizar, seguido por San José y Tossi (comparten valores similares), y por último NP. Estas diferencias podrían explicarse por diferencias en la historia de fertilización, además de otras características como la textura más gruesa y menor contenido de materia orgánica del sitio Candil, las cuales podrían determinar una menor fijación del P agregado. En concordancia con esto, en Candil fue donde también se determinaron los mayores valores de P WEP, y por ende sería el sitio con mayor potencial contaminación con P de los cauces de agua.

Para los sitios Candil y Tossi, el modelo de respuesta de P lábil del suelo a la fertilización fosfatada mostró una respuesta de tipo exponencial en las fechas más próximas de muestreo, mientras que la respuesta se tornó lineal hacia las últimas fechas de muestreo.

Para la mayoría de los sitios, fechas y métodos de determinación de P disponible, la estimación del EF se ajustó mejor (mayores valores de R^2) a una relación exponencial que a una lineal. Además, se reforzó el concepto de que se deben definir claramente los momentos a los cuales se estiman los valores de EF, porque varían más entre momentos que entre suelos y si no carecerían de sentido.

El modelo de respuesta de P lábil del suelo a la fertilización fosfatada se evaluó en los sitios de Candil y Tossi únicamente, ya que estos fueron los sitios donde se realizaron varios muestreos (Candil a los 56, 132 y 204, Tossi a los 54, 137 y 202 días desde de la instalación del ensayo). En las fechas más próximas de muestreo se observó una respuesta de tipo exponencial, mientras que la respuesta se tornó lineal hacia las últimas fechas de muestreo.

Otro parámetro que determina la disponibilidad de P luego de su aplicación, es el equivalente fertilizante (EF). De acuerdo con lo anterior, y para la mayoría de los sitios, fechas y métodos de determinación de P disponible, la estimación del EF se ajustó mejor (mayores valores de R^2) a una relación exponencial que a una lineal. Además, se reforzó el concepto de que se deben definir claramente los momentos a los cuales se estiman los valores de EF, porque varían más entre momentos que entre suelos y si no carecerían de sentido.

Si bien no se contaron con todos los valores de P Bray I a los intervalos adecuados de tiempo para estimar la ecuación de tasa de descenso (TD) estos resultados son auspiciosos en cuanto a realizar nuevos ensayos para estimar este parámetro. Sin desmedro de lo anterior, la TD del P disponible obtenida luego de la fertilización fue mayor a lo reportado por otros autores. Para todas las dosis, estos niveles cayeron hasta llegar a un punto de equilibrio, que estuvo solo un poco por encima del nivel del que se partió previo a la fertilización. Por tanto, el valor de TD durante ese período fue cercana al 100%. La tendencia de caída de P en el suelo en el tiempo fue similar en ambos sitios, aunque más pronunciada en Tossi que en Candil. Además, la TD en ambos sitios fue mayor para las dosis de fertilizante más elevadas.

En forma inversa a lo observado con la TD, el EF aumentó a medida que transcurrió el tiempo desde la fertilización, lo cual podría deberse a la caída de los niveles de P en el suelo. A su vez, a mayores niveles de fertilización, el EF descendió.

En cuanto a la estimación de la dosis óptima de P_2O_5 a agregar a partir del modelo lineal y exponencial, en la fecha más cercana a la fertilización, los valores de dosis y R^2 de los modelos variaron entre sí, siendo mayores para el modelo exponencial. Esta diferencia en la dosis fue mayor cuando el valor de análisis de suelo actual estuvo más alejado del nivel crítico. En cambio, al final del ensayo, al estabilizarse los valores de P disponible en el suelo, ambos modelos presentaron similares R^2 y dosis óptimas estimadas.

En este trabajo también se estimaron las dosis a agregar en cada sitio utilizando un valor único de EF. La razón de hacer esta estimación fue que en la realidad agropecuaria generalmente no se dispone del valor exacto de cada sitio. El valor único de EF utilizado fue 6 kg/ha P_2O_5 /ppm (promedio de los valores de EF obtenido con el modelo lineal para la primera fecha de muestro de 3 de los sitios exceptuando San José para la profundidad de 0-7,5 cm). Utilizando los valores transformados a P Bray I de los demás métodos y el NC

del trébol blanco, se observó que en relación con usar un valor variable de EF, la tendencia fue que tanto los valores de dosis a agregar como la variación entre estas disminuyeron. Pero sin embargo estas estimaciones fueron inferiores a las del método de referencia (P Bray I modelo exponencial).

6. RESUMEN

El fósforo (P) en la mayoría de los suelos del Uruguay es el principal nutriente limitante de la producción, lo que lo hace uno de los más utilizados a la hora de fertilizar pasturas y cultivos. Dada la problemática de contaminación de aguas asociada a mal manejo de este nutriente, la estimación de la dosis de fertilización fosfatada debería basarse en análisis de suelo para la cual se encuentran en uso una variedad de métodos con diferentes extractantes. Los objetivos específicos de este estudio fueron: (a) evaluar la relación mediante análisis de regresión, entre los métodos de determinación de P lábil en el suelo (P Bray I, P Cítrico, P Mehlich III y P WEP), de forma de determinar el nivel de asociación entre ellos y establecer ecuaciones que permitan transformar cuantitativamente los valores de un método en otro para el rango de los suelos estudiados; (b) determinar la variación en el tiempo de los contenidos de P disponible en el suelo extraído por distintos métodos de análisis frente al agregado de diferentes dosis de fertilizante fosfatado soluble, y estimar funciones para calcular las tasas de descenso y el equivalente fertilizante a distintos momentos para cada sitio y tratamiento; (c) evaluar la posibilidad de utilizar el método P WEP no solo como indicador ambiental, sino también como indicador agronómico. Se dispusieron 4 sitios de estudio en los departamentos de San José (San José), Canelones (NP) y Florida (Candil y Tossi). Para cada sitio, previo a esta tesis, se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización (0, 40, 80 y 120 Kg de P_2O_5 ha⁻¹) con superfosfato triple (aplicado al voleo y en cobertura) utilizando un diseño de bloques al azar (3 repeticiones). Para los sitios San José y NP se pudo realizar un solo muestreo mientras que para Candil y Tossi se realizaron tres. Para todos los muestreos se evaluaron dos profundidades 0-7,5 y 7,5-15 cm. Los resultados mostraron que, en la mayoría de los casos, para la profundidad de 0-7,5 cm, se observaron aumentos en el contenido de P lábil asociados a la fertilización, mientras que los valores obtenidos de P disponible (ppm) en la misma profundidad, siguieron en todos los sitios la siguiente secuencia: P Mehlich III > P Cítrico > P Bray I > P WEP. Por otra parte, todos los métodos se relacionaron entre sí. Para todos los sitios y muestreos, el método que presentó un R^2 mayor (0,93) con P Bray I fue P Mehlich III, seguido de P Cítrico con un $R^2=0,89$ y el P WEP con un $R^2=0,78$, aunque el sitio San José tendió apartarse sobre todo en el caso de P Mehlich III. En líneas generales, Candil fue el sitio que presentó mayores niveles de P extraído con todos los métodos y para todas las fechas de muestreo y por ende sería el sitio con mayor potencial de pérdida de P contribuyendo a la contaminación de los cauces de agua. Respecto a la tasa de descenso (TD) estimada a los 365 días y considerando el nivel original del suelo desde la fertilización, se observó que los sitios Candil y Tossi, registraron valores de 100% y de 95, 91 y 93% respectivamente, para las dosis de 40, 80 y 120 Kg de

P_2O_5 ha⁻¹. Por su parte, en el equivalente fertilizante (EF) para la mayoría de los sitios, fechas y métodos de determinación de P disponible, la estimación del EF se ajustó mejor (mayores valores de R^2) a una relación exponencial que a una lineal. Para la profundidad de 7,5-15 cm no se encontró una respuesta significativa al agregado de fertilizante y no se realizaron los cálculos de TD y EF, ya que, al tratarse de un nutriente no móvil, el movimiento del fertilizante agregado no superó la profundidad de 0-7,5 cm. Al comparar los resultados de utilizar distintos modelos para estimar las dosis necesarias para alcanzar el nivel crítico del trébol blanco (especie ejemplo), se observó que, de acuerdo con lo esperado, el modelo exponencial estimó mayores dosis que el lineal. Esta tendencia se observó tanto para los valores observados como para las transformaciones a P Bray I de los demás métodos. Cuando se utilizaron los valores observados, las diferencias promedio (sin el Sitio San José) variaron entre 9 a 14 Kg P_2O_5 ha⁻¹. Cuando se usaron, en cambio, los valores de los demás métodos transformados a P Bray I, las diferencias promedio entre modelos disminuyeron y fluctuaron entre 2 a 14 Kg P_2O_5 ha⁻¹ (diferencias que no fueron importantes desde el punto de vista práctico).

Palabras clave: Fósforo; P Bray I; P Mehlich III; P Cítrico; P WEP; Tasa de descenso; Equivalente fertilizante; Modelo lineal; Modelo exponencial; Nivel crítico; Coeficiente de extracción.

7. SUMMARY

Phosphorus (P) in most of Uruguay's soils is the main limiting nutrient in production, which makes it one of the most used when fertilizing pastures and crops. Given the problem of water contamination associated with poor handling of this nutrient, the estimation of the dose of phosphate fertilization should be based on soil analysis for which a variety of methods with different extractants are in use. The specific objectives of this study were: (a) to evaluate the relationship by means of regression analysis, among the methods of determination of labile P in the soil (P Bray I, P Cítrico, P Mehlich III and P WEP), in order to determine the level of association between them and establish equations that allow quantitatively transform the values of one method in another for the range of the studied soils; (b) determine the variation in time of the contents of P available in the soil extracted by different methods of analysis against the addition of different doses of soluble phosphate fertilizer, and estimate functions to calculate the rates of decline and the fertilizer equivalent at different times for each site and treatment; (c) evaluate the possibility of using the P WEP method not only as an environmental indicator, but also as an agronomic indicator. Four study sites were set up in the provinces of San José (San José), Canelones (NP) and Florida (Candil y Tossi). For each site, prior to this thesis, four fertilization treatments (0, 40, 80 and 120 Kg of P_2O_5 ha⁻¹) were applied with triple superphosphate (applied broadcast and in coverage) using a randomized block design (3 repetitions). For the San José and NP sites, only one sampling was possible, while for Candil and Tossi three were made. For all the samplings, two depths 0-7,5 and 7,5-15 cm were evaluated. The results showed that, in the majority of cases, for the depth of 0-7,5 cm, increases in the labile P content associated with fertilization were observed, while the values obtained from available P (ppm) in the same depth, the following sequence was followed in all places: P Mehlich III > P Cítrico > P Bray I > P WEP. Moreover, all the methods were related to each other. For all sites and samplings, the method that presented a higher R^2 (0,93) with P Bray I was P Mehlich III, followed by P Citrus with $R^2 = 0.89$ and P WEP with $R^2 = 0,78$, although the site San José tended to move away especially in the case of P Mehlich III. In general, Candil was the site that presented the highest levels of P extracted with all the methods and for all the sampling dates and, therefore, it would be the site with the highest P loss potential, contributing to the contamination of the watercourses. Regarding the decrease rate (DR) estimated at 365 days and considering the original soil level since fertilization, it was observed that the Candil and Tossi sites registered values of 100% and of 95, 91 y 93% respectively, for the doses of 40, 80 and 120 Kg of P_2O_5 ha⁻¹. Furthermore, in the fertilizer equivalent (FE) for most of the sites, dates and methods of determination of available P, the estimation of the FE was better

adjusted (higher values of R^2) to an exponential relationship rather than to a linear one. For the depth of 7,5-15 cm., no significant response was found to the fertilizer aggregate and the calculations of DR and FE were not made since, being a non-mobile nutrient, the movement of the added fertilizer did not exceed the depth of 0-7,5 cm. When comparing the results of using different models to estimate the necessary doses to reach the critical level of white clover (example species), it was observed that, according to expected, the exponential model estimated higher doses than the linear one. This trend was noticed both for the observed values and for the transformations to P Bray I of the other methods. When the observed values were employed, the average differences (without the San José Site) ranged from 9 to 14 Kg P_2O_5 ha⁻¹. When the values of the other methods transformed to P Bray I were used instead, the average differences between models decreased and fluctuated between 2 to 14 Kg P_2O_5 ha⁻¹ (differences that were not important from the practical point of view).

Keywords: Phosphorus; P Bray I; P Mehlich III; P Citrus; P WEP; Decrease rate; Fertilizer equivalent; Linear model; Exponential model; Critical level; Extraction coefficient.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abella, M.; Nin, A. 2003. Evolución en las formas y contenidos de fósforo del suelo bajo sistemas de rotaciones de pasturas y cultivos con laboreo convencional y siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 65 p.
2. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echevarría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay; clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
3. Baethgen, W.; Pérez, J. 1981. Efecto residual de la fertilización fosfatada en una rotación agrícola – ganadera. (en línea). Miscelánea CIAAB no. 37: 1-17. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en <http://www.inia.org.uy/sitios/lesis/fertilizacion/UY.CIAAB.MISC.1981.no.37.Baethgen.pdf>
4. Bermúdez, R.; Ayala, W. 2008. Métodos para estimar la disponibilidad de fósforo en los suelos. In: Seminario de Actualización Técnica: Fertilización Fosfatada de Pasturas en la Región Este (2008, Treinta y Tres). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 7-15 (Serie Técnica no. 172).
5. Black, C. A. 1993. Soil Fertility Evaluation and Control. Residual Effects. Boca Raton, Florida, USA, Lewis. pp. 519-565
6. Bond, C.; Maguire, R.; Havlin, J. 2006. Change in Soluble Phosphorus in Soils following Fertilization is Dependent on Initial Mehlich-3 Phosphorus. (en línea). Journal Environmental Quality. 35:1818–1824. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16899753>
7. Bordoli, J. s.f. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 02 may. 2017. Disponible en http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/Dinamica_nutrientes_en_SD.pdf

8. Cabalceta, G. 1995. Correlación de soluciones extractoras de fósforo en suelos de Costa Rica. (en línea). Agronomía Costarricense. 19 (1): 29-37. Consultado 02 feb. 2018. Disponible en http://www.mag.go.cr/rev_agr/v19n01_029.pdf
9. Capelle, J. M. 2011. Fertilización fosfatada de trigo. (en línea). Tesis Ing. Agr. Buenos Aires, Argentina. Universidad Católica Argentina. Facultad de Ciencias Agrarias. 43 p. Consultado 08 dic. 2016. Disponible en <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/fertilizacion-fosfatada-trigo-juan-capelle.pdf>
10. Castro, J.; de Zamuz, E.; Barboza, S. 1981a. Fertilización de pasturas en el litoral oeste de Uruguay. (en línea). Investigaciones Agronómicas. 2 (1): 56-67. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en <file:///C:/Users/Gast%C3%B3n/Downloads/Inv.Agr.-1981-No.2.pdf>
11. _____.; _____.; Oudri, N. 1981b. Guía para la fertilización de pasturas. (en línea). Miscelánea CIAAB no. 37: 1-15. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en <http://www.inia.org.uy/sitios/tesis/fertilizacion/UY.CIAAB.MISC.1981.no.37.GuiaCastro.pdf>
12. Ciampetti, I. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. (en línea). Tesis MSc. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 116 p. Consultado 08 dic. 2016. Disponible en [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/7310afb32c62918a032579030053e4a5/\\$FILE/Ciampetti2009-MasterScience.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/7310afb32c62918a032579030053e4a5/$FILE/Ciampetti2009-MasterScience.pdf)
13. Erro, J. M.; Möller, R.; Saavedra, M. 2012. Respuesta al agregado de fósforo en soja de segunda. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 93 p.
14. Fernández, C.; Mendoza, R. 2008. Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos de distintos suelos y manejos productivos. (en línea). Ciencia del Suelo. 26 (1): 13-27. Consultado 10 dic. 2016. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672008000100002

15. Fixen, P.; Grove, J. 1990. Testing soils for phosphorus. *In*: Westerman, R. L. ed. Soil testing and plant analysis. 3rd. ed. Madison, WI, USA, SSSA. pp.141-181.
16. García, F.; Picone, L. s.f. Fósforo; dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. (en línea). Acassuso, Buenos Aires, International Plant Nutrition Institute. 9 p. Consultado 08 dic. 2016. Disponible en [http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b85257900057902e/40ad1eee26c802f005257a5300510c6d/\\$FILE/Dinami cafosforo.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b85257900057902e/40ad1eee26c802f005257a5300510c6d/$FILE/Dinami%20cafosforo.pdf)
17. _____; Ciampitti, A.; Rubio, G.; Picone, L. 2009. La fertilización fosfatada en la argentina; actualidad, manejo y perspectivas. (en línea). *In*: Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables; Fósforo, Nitrógeno y Cultivos de Cobertura (2009, Bahía Blanca, Argentina). La fertilización fosfatada en la Argentina; actualidad, manejo y perspectivas. s.n.t. s.p. Consultado 08 dic. 2016. Disponible en <http://www.creaoeste.org.ar/wp-content/uploads/2015/02/Garcia-Ciampitti-Rubio-Picone-Fosforo-2009.pdf>
18. _____; Picone, L.; Ciampitti, A. 2014. Fósforo. *In*: Echeverría, E.; García, F. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Buenos Aires, Argentina. INTA. pp. 229-264.
19. Gee, G. W.; Bauder, J. W. 1986. Particle-size Analysis. (en línea). *In*: Klute, A. ed. Methods of soil analysis; physical and Mineralogical Methods. 2nd. ed. Madison, WI, American Society of Agronomy. pt. 1, pp. 383-409. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en http://redbiblio.unne.edu.ar/pdf/0603-003891_1.pdf
20. González, M.; López, M. V.; Moreno, G.; Comese Madero, M. 2007. Comparación de los métodos Bray y Kurtz No.1 y Mehlich III en la determinación de la disponibilidad de fósforo en suelos con fertilizaciones continuas. (en línea). Ciencia del Suelo. 25 (1):23-29. Consultado 09 jul. 2017. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672007000100004

21. Hernández, J.; Otegui, O.; Zamalvide, J. P. 1995. Formas y contenido de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín de Investigación no. 43. 27 p.
22. _____. 2010. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
23. Jalali, M.; Jalali, M. 2016. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. (en línea). Science of the Total Environment. 566-567: 1080-1093. Consultado 11 dic. 2016. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716310634>
24. Lattanzi, F.; Zarza, R.; Cuadro, R. 2016. Herramientas para ayudar a la toma de decisión de fertilización fosfatada de pasturas. In: Jornada de Producción Lechera (2016, Colonia). Manejo de pasturas, crianza y vaca en transición. Montevideo, INIA. pp. 15-16 (Actividades de Difusión no.767).
25. Mallarino, A.; Blackmer, A. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. (en línea). Agronomy Journal. 84:850-856. Consultado 11 dic. 2016 Disponible en http://academic.uprm.edu/dsotomayor/agro6505/Mallarino_aj-84-5-AJ0840050850.pdf
26. _____. 1995. Comparison of Mehlich-3, Olsen, and Bray-P1 procedures for phosphorus in calcareous soils. (en línea). In: North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference (25th., 1995, St. Louis, Missouri). Proceedings. St. Louis, Missouri, s.e. pp. 96-101. Consultado 05 may. 2017. Disponible en <http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ComparisonofMehlich-3OlsenandBray-P1Procedures.pdf>
27. _____.; Stewart, B. M.; Baker, J. L.; Downing, J. D.; Sawyer, J. E. 2002. Phosphorus indexing for cropland; overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index. (en línea). Journal of Soil and Water Conservation. 57(6): 440-447. Consultado 20 feb. 2018. Disponible en <http://www.jswconline.org/content/57/6/440.full.pdf>

28. MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, UY). 2013. Plan de acción para la protección de la calidad ambiental y la disponibilidad de las fuentes de agua potable en la cuenca del Santa Lucia. (en línea). Montevideo 35 p. Consultado 04 ago. 2016. Disponible en <http://www.rapaluruquay.org/agrotoxicos/Uruguay/santalucia-plan-monitoreo-MVOTMA-mayo-2013.pdf>
29. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay; descripción de las unidades de suelo. Montevideo. t.3, 452 p.
30. Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant; a modification of Mehlich 2 extractant. (en línea). Communications in Soil Science and Plant Analysis 15 (12): 1409-1416. Consultado 9 dic. 2016. Disponible en [doi: 10.1080/00103628409367568](https://doi.org/10.1080/00103628409367568)
31. MGAP. DIRENARE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección Nacional de Recursos Naturales Renovables, UY). 1986. Compendio actualizado de información de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1:1.000.000. 1 disco compacto.
32. Perdomo, C.; Durán, J.; Llovet, P. 2007. Soil and Plant Indices for Predicting Eucalypt Response to Nitrogen in Uruguay. (en línea). Soil Science Society of American Journal. 71 (5): s.p. Consultado 12 may. 2017. Disponible en <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/71/6/1708?access=0&view=pdf>
33. _____.; Barreto, P.; Piñeiro, V. 2015a. Pérdidas de fósforo desde suelos agrícolas hacia aguas superficiales: resultados preliminares para Uruguay y posibles medidas de manejo para mitigar riesgos. In: Simposio Nacional de Agricultura (4º., 2015, Paysandú). Buscando el camino para la intensificación sostenible de la agricultura. Paysandú, Uruguay, s.e. s.p.
34. _____. 2015b. Síntesis de seminarios calidad de aguas y sistemas agropecuarios. Relaciones entre el nivel de fósforo y calidad del agua de escurrimiento. Revista INIA. no. 42: 42.

35. _____. 2015c. Recomendación de dosis de fertilización. In: Curso de Fertilidad de Suelos (2015, Montevideo). Textos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 6 p. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/RecDosis_impr.pdf
36. Rabuffeti, A. 2017. La fertilidad del suelo y su manejo. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. v.2, 502 p.
37. Rubio, G.; Cabello, M.; Gutiérrez, F. 2007. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas sur y norte de la región pampeana. (en línea). Informaciones Agronómicas del Cono Sur (IPNI). no. 35: 6-10. Consultado 11 ago. 2017. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Gerardo_Rubio/publication/240621990_Cuanto_fosforo_hay_que_aplicar_para_alcanzar_el_umbral_critico_de_fosforo_disponible_en_el_suelo_II_Calculos_para_las_zonas_Sur_y_Norte_de_la_Region_Pampeana/links/55c3b54008aea2d9bdc1c4d5/Cuanto-fosforo-hay-que-aplicar-para-alcanzar-el-umbral-critico-de-fosforo-disponible-en-el-suelo-II-Calculos-para-las-zonas-Sur-y-Norte-de-la-Region-Pampeana.pdf?origin=publication_detail
38. Sawyer, J.; Mallarino, A. 1999. Differentiating and Understanding the Mehlich 3, Bray, and Olsen Soil Phosphorus Tests. (en línea). In: Annual Crop Pest Management Short Course (19th., 1999, St. Paul, Minnesota). Proceedings and Presentations. St. Paul, MN, USA. s.p. Consultado 02 feb. 2018. Disponible en <http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/presentations/mbotest.pdf>
39. Sharpley, A. 1995. Soil phosphorus dynamics; agronomic and environmental impacts. (en línea). Ecological Engineering. 5 (2-3): 261–279. Consultado 8 dic. 2016. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925857495000275>
40. Smith, V. H.; Schindler, D. W. 2009. Eutrophication science; where do we go from here? (en línea). Trends in Ecology and Evolution. 24 (4): 201- 207. Consultado 8 dic. 2016. Disponible en [doi:10.1016/j.tree.2008.11.009](https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009)

41. Stewart, J.; Sharpley, A. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. (en línea). In: Follett, R. F.; Stewart, J. W. B.; Colle, C. V. eds. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. Madison, WI, SSSA. cap. 6, pp. 101-121 (Special publication no. 19). Consultado 8 dic. 2016. Disponible en <https://naldc.nal.usda.gov/download/19190/PDF>

42. Thomas, G. W. 1982. Exchangeable Cations. (en línea). In: Page, A. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASA/SSSA. pp.159-165. Consultado 10 jul. 2017. Disponible en <https://www.google.com.uy/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwih14HskPvXAhVJQt8KHZWHA5IQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fdl.sciencesocieties.org%2Fpublications%2Fbooks%2Fpdfs%2Fagronomymonogra%2Fmethodsofsoilan2%2Ffrontmatter&usq=AOvVaw0agbnC3Vz9EyldkmPMdgry>

43. Tisdale, S.; Nelson, W.; Beaton, J.; Havlin, J. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. 5th. ed. New Jersey, Prentice-Hall. 634 p.

44. UdelaR. FA (Universidad de la República. Facultad de Agronomía, UY). 2001. Propiedades físico-químicas de los suelos. Montevideo. 47 p.

45. USDA. NRCS (United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, US). 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. (en línea). Washington, D. C. 886 p. Consultado 10 ene. 2016. Disponible en https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf

46. Walkley, A.; Black, I. A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. (en línea). Soil Science. 37:29-38. Consultado 15 feb. 2018 Disponible en http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1934/01000/An_Examination_of_the_Degtjareff_Method_for.3.aspx

47. Wang, Y.; Zhang, T.; O'Halloran, I.; Hu, Q.; Speranzini, D.; Macdonald, I.; Petterson, G. 2015 Agronomic and environmental soil phosphorus test for predicting potential phosphorus loss from Ontario soils. (en línea). *Geoderma*. 241-242: 51-58. Consultado 10 dic. 2016. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706114003899>
48. Wangkhem, H.; Herojit, S.; Raj, K.; Linthoi, W.; Nandini, C.; Konthoujam, N.; Naorem, B.; Khwairakpam, L.; Naorem, J. 2015. Evaluation of some soil test methods in acid soils for available phosphorus for imphal east district, Manipur. (en línea). *African Journal of Agricultural Research*. 10 (8): 767-771. Consultado 14 feb. 2018. Disponible en <http://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-textpdf/ECF5D5450611>
49. Wolf, A. W.; Moore, P. A. Jr.; Fayetteville, Kleinman, P. J. A.; Sullivan, D. M. 2009. Water-Extractable Phosphorus in Animal Manure and Biosolids. (en línea). In: Kovar, J.; Pierzynski, G. eds. *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters*. (en línea). 2nd. ed. s.l., SERA-IEG. pp. 76-94 (Southern Cooperative Series Bulletin). Consultado 11 dic. 2016. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.606.5702&rep=rep1&type=pdf>
50. Zamalvide, J. 1992. Dinámica del fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. *Revista INIA*. 1(1): 85-93.

9. ANEXOS

ANEXO 1. Valores de R^2 , R^2 ajustado y el coeficiente de variación (CV), según distintos métodos de análisis, para los diferentes sitios y profundidad de muestreo (0-7,5 y 7,5-15 cm).

Sitio	Profundidad (cm)	Fecha	Variable	n	R^2	R^2 Ajustado	CV (%)
Candil	0-7,5	28-05-14	P Bray I	11	0,96	0,92	15,17
Candil	0-7,5	12-08-14	P Bray I	12	0,70	0,45	19,36
Candil	0-7,5	23-10-14	P Bray I	11	0,77	0,54	21,16
Candil	7,5-15	28-05-14	P Bray I	12	0,77	0,58	33,79
Candil	7,5-15	12-08-14	P Bray I	12	0,32	0,00	30,87
Candil	7,5-15	23-10-14	P Bray I	11	0,34	0,00	56,03
NP	0-7,5	28-08-14	P Bray I	10	0,98	0,97	13,54
NP	7,5-15	28-08-14	P Bray I	12	0,48	0,05	49,28
San José	0-7,5	29-05-14	P Bray I	12	0,79	0,62	19,82
San José	7,5-15	29-05-14	P Bray I	12	0,84	0,71	17,98
Tossi	0-7,5	28-05-14	P Bray I	11	0,96	0,92	11,96
Tossi	0-7,5	19-08-14	P Bray I	12	0,79	0,61	22,90
Tossi	0-7,5	23-10-14	P Bray I	12	0,45	0,00	29,06
Tossi	7,5-15	28-05-14	P Bray I	12	0,30	0,00	39,38
Tossi	7,5-15	19-08-14	P Bray I	12	0,52	0,01	17,42
Tossi	7,5-15	23-10-14	P Bray I	12	0,57	0,21	27,86
Candil	0-7,5	28-05-14	P Mehlich III	11	0,90	0,81	29,30
Candil	0-7,5	12-08-14	P Mehlich III	12	0,55	0,17	22,11
Candil	0-7,5	23-10-14	P Mehlich III	9	0,94	0,84	14,66
Candil	7,5-15	28-05-14	P Mehlich III	11	0,39	0,00	39,63
Candil	7,5-15	12-08-14	P Mehlich III	12	0,48	0,05	30,08
Candil	7,5-15	23-10-14	P Mehlich III	12	0,81	0,65	32,88
NP	0-7,5	28-08-14	P Mehlich III	10	0,96	0,90	24,27
NP	7,5-15	28-08-14	P Mehlich III	12	0,80	0,64	11,59
San José	0-7,5	29-05-14	P Mehlich III	11	0,87	0,74	20,73
San José	7,5-15	29-05-14	P Mehlich III	12	0,58	0,22	27,74
Tossi	0-7,5	28-05-14	P Mehlich III	12	0,93	0,87	14,40
Tossi	0-7,5	19-08-14	P Mehlich III	12	0,80	0,63	25,74
Tossi	0-7,5	23-10-14	P Mehlich III	12	0,77	0,58	20,94
Tossi	7,5-15	28-05-14	P Mehlich III	12	0,66	0,38	21,34
Tossi	7,5-15	19-08-14	P Mehlich III	12	0,13	0,001	37,65

Tossi	7,5-15	23-10-14	P Mehlich III	12	0,51	0,11	29,16
Candil	0-7,5	28-05-14	P Cítrico	11	0,89	0,79	27,10
Candil	0-7,5	12-08-14	P Cítrico	11	0,91	0,83	13,04
Candil	0-7,5	23-10-14	P Cítrico	11	0,73	0,45	18,91
Candil	7,5-15	28-05-14	P Cítrico	12	0,61	0,28	33,52
Candil	7,5-15	12-08-14	P Cítrico	12	0,31	0,00	42,96
Candil	7,5-15	23-10-14	P Cítrico	12	0,44	0,00	25,11
NP	0-7,5	28-08-14	P Cítrico	11	0,89	0,77	33,56
NP	7,5-15	28-08-14	P Cítrico	12	0,60	0,27	26,97
San José	0-7,5	29-05-14	P Cítrico	10	0,93	0,84	8,03
San José	7,5-15	29-05-14	P Cítrico	12	0,40	0,00	23,41
Tossi	0-7,5	28-05-14	P Cítrico	11	0,93	0,87	13,70
Tossi	0-7,5	19-08-14	P Cítrico	12	0,84	0,70	22,35
Tossi	0-7,5	23-10-14	P Cítrico	12	0,53	0,14	23,25
Tossi	7,5-15	28-05-14	P Cítrico	12	0,42	0,00	29,03
Tossi	7,5-15	19-08-14	P Cítrico	12	0,33	0,00	17,96
Tossi	7,5-15	23-10-14	P Cítrico	12	0,48	0,05	18,57

ANEXO 2. Valores máximos (Máx.), valores mínimos (Mín.) y concentraciones promedio (media) de P lábil (ppm), y parámetros estadísticos [desvío estándar (D.E.), error estándar (E.E.), número de muestras (n) y coeficiente de variación (C.V.)] según distintos métodos de análisis para los diferentes sitios, según dosis de P_2O_5 ha⁻¹ aplicada, fecha (año 2014) y profundidad de muestreo (0-7,5 y 7,5-15 cm).

Sitio	Profundidad (cm)	Fecha	Variable	n	Media	D.E.	E.E.	C.V(%)	Mín.	Máx.
Candil	0-7,5	28-05-14	P Bray I	11	22,96	12,5	3,77	54,45	14	50,6
Candil	0-7,5	28-05-14	P Mehlich III	11	31,94	21,4	6,45	67,02	14,8	82,3
Candil	0-7,5	28-05-14	P Cítrico	11	27,98	16,44	4,96	58,78	12,5	66,2
Candil	0-7,5	08-12-14	P Bray I	12	14,68	3,84	1,11	26,19	9,9	21,4
Candil	0-7,5	08-12-14	P Mehlich III	12	15,76	3,82	1,1	24,24	10,5	25,4
Candil	0-7,5	08-12-14	P Cítrico	11	13,95	4,36	1,32	31,29	6,5	20,8
Candil	0-7,5	23-10-14	P Bray I	11	12,64	3,92	1,18	31,05	8	19,6
Candil	0-7,5	23-10-14	P Mehlich III	9	12,96	4,69	1,56	36,22	8,3	21,8
Candil	0-7,5	23-10-14	P Cítrico	11	14,09	3,6	1,09	25,56	9,5	18,6
Candil	7,5-15	28-05-14	P Bray I	12	5,18	2,71	0,78	52,36	2,6	12,6
Candil	7,5-15	28-05-14	P Mehlich III	11	5,19	1,86	0,56	35,9	3,2	9,4
Candil	7,5-15	28-05-14	P Cítrico	12	5,05	1,99	0,58	39,46	3	8,7
Candil	7,5-15	08-12-14	P Bray I	12	3,96	1,09	0,32	27,58	2,8	6,3
Candil	7,5-15	08-12-14	P Mehlich III	12	3,83	1,18	0,34	30,79	2	5,8
Candil	7,5-15	08-12-14	P Cítrico	12	3,76	1,44	0,41	38,25	1,5	5,6
Candil	7,5-15	23-10-14	P Bray I	11	3,54	1,73	0,52	48,79	1,5	8
Candil	7,5-15	23-10-14	P Mehlich III	12	6,05	3,39	0,98	55,97	2,7	14,6
Candil	7,5-15	23-10-14	P Cítrico	12	5,78	1,43	0,41	24,78	3,7	9,5
NP	0-7,5	28-08-14	P Bray I	10	10,09	7,42	2,35	73,56	2,8	24
NP	0-7,5	28-08-14	P Mehlich III	10	13,88	11,01	3,48	79,36	4,3	34,4
NP	0-7,5	28-08-14	P Cítrico	11	12,21	8,63	2,6	70,7	3,5	27,4

NP	7,5-15	28-08-14	P Bray I	12	2,85	1,44	0,41	50,44	1,8	6,9
NP	7,5-15	28-08-14	P Mehlich III	12	4,14	0,79	0,23	19,19	3,3	5,6
NP	7,5-15	28-08-14	P Cítrico	12	2,47	0,78	0,22	31,51	0,7	3,9
San José	0-7,5	29-05-14	P Bray I	12	14,91	4,79	1,38	32,1	8	26,2
San José	0-7,5	29-05-14	P Mehlich III	11	24,59	10,02	3,02	40,74	13,2	49,5
San José	0-7,5	29-05-14	P Cítrico	10	17,98	3,59	1,14	19,97	13,7	23,9
San José	7,5-15	29-05-14	P Bray I	12	3,49	1,16	0,34	33,3	2,2	5,8
San José	7,5-15	29-05-14	P Mehlich III	12	5,1	1,6	0,46	31,45	3,2	8,9
San José	7,5-15	29-05-14	P Cítrico	12	3,43	0,77	0,22	22,34	2,2	4,6
Tossi	0-7,5	28-05-14	P Bray I	11	14,74	6,16	1,86	41,77	6,8	25
Tossi	0-7,5	28-05-14	P Mehlich III	12	20,61	8,18	2,36	39,69	9,8	36,2
Tossi	0-7,5	28-05-14	P Cítrico	11	16,95	6,44	1,94	37,98	8,2	28,6
Tossi	0-7,5	19-08-14	P Bray I	12	9,79	3,58	1,03	36,58	5,2	15,9
Tossi	0-7,5	19-08-14	P Mehlich III	12	12,04	5,07	1,46	42,13	5,4	20,7
Tossi	0-7,5	19-08-14	P Cítrico	12	11,05	4,52	1,31	40,95	4,8	20,8
Tossi	0-7,5	23-10-14	P Bray I	12	9,67	2,8	0,81	29,01	5,9	15,6
Tossi	0-7,5	23-10-14	P Mehlich III	12	10,24	3,29	0,95	32,14	6,9	17,1
Tossi	0-7,5	23-10-14	P Cítrico	12	10,62	2,66	0,77	25,08	7,4	18,1
Tossi	7,5-15	28-05-14	P Bray I	12	4,32	1,5	0,43	34,75	2,5	6,9
Tossi	7,5-15	28-05-14	P Mehlich III	12	4,14	1,12	0,32	27,07	2,5	6,4
Tossi	7,5-15	28-05-14	P Cítrico	12	3,12	0,88	0,25	28,17	1,9	5
Tossi	7,5-15	19-08-14	P Bray I	12	3,12	0,58	0,17	18,6	2,5	4,5
Tossi	7,5-15	19-08-14	P Mehlich III	12	2,85	0,85	0,24	29,75	1,6	4,1
Tossi	7,5-15	19-08-14	P Cítrico	12	2,82	0,46	0,13	16,22	2	3,8
Tossi	7,5-15	23-10-14	P Bray I	12	2,73	0,86	0,25	31,37	1,5	4,1
Tossi	7,5-15	23-10-14	P Mehlich III	12	3,71	1,14	0,33	30,86	2,6	6,5
Tossi	7,5-15	23-10-14	P Cítrico	12	4,6	0,88	0,25	19,06	2,7	5,5

ANEXO 3. Prueba de hipótesis para contrastes para P Bray I por sitio, fecha y profundidad (0-7,5 cm).

P Bray I (0-7,5 cm)								
Sitio	Fecha	Dosis	Contraste	E.E.	F	gl (núm.)	gl (den)	p-valor
Candil	28-05-14	Ct.1	42,37	6,16	47,27	1	5	0,001
		Ct.2	-11,77	7,89	2,22	1	5	0,1961
		Ct.3	61,4	7,39	68,95	1	5	0,0004
		Total			54,86	3	5	0,0003
	12-08-14	Ct.1	17,23	5,68	9,2	1	6	0,023
		Ct.2	12,9	7,33	3,09	1	6	0,1291
		Ct.3	16,73	6,56	6,51	1	6	0,0434
		Total			3,4	3	6	0,0945
	23-10-14	Ct.1	12,09	5,47	4,88	1	5	0,0791
		Ct.2	10,29	7	2,16	1	5	0,2016
		Ct.3	1,91	6,59	0,08	1	5	0,7832
		Total			4,59	3	5	0,0671
Tossi	28-05-14	Ct.1	30,43	3,61	70,92	1	5	0,0004
		Ct.2	10,91	4,62	5,57	1	5	0,0647
		Ct.3	30,85	4,36	50,02	1	5	0,0009
		Total			37,55	3	5	0,0007
	19-08-14	Ct.1	16,5	4,48	19,54	1	6	0,0103
		Ct.2	15,3	5,79	6,99	1	6	0,0384
		Ct.3	7	5,18	1,83	1	6	0,2252
		Total			6,57	3	6	0,0253
	23-10-14	Ct.1	9,07	5,09	3,17	1	6	0,1251
		Ct.2	7,2	6,57	1,2	1	6	0,31,51
		Ct.3	4,53	5,88	0,6	1	6	0,4697
		Total			1,79	3	6	0,2497
San José	29-05-14	Ct.1	12,3	5,91	4,33	1	6	0,0825
		Ct.2	2,97	7,63	0,15	1	6	0,7108
		Ct.3	11,27	6,92	2,79	1	6	0,1498
		Total			4,38	3	6	0,0599

NP	28-08-14	Ct.1	27	2,79	93,9	1	4	0,0006
		Ct.2	0,76	3,55	0,05	1	4	0,8409
		Ct.3	30	3,47	74,81	1	4	0,001
		Total			86,99	3	4	0,0004

ANEXO 4. Prueba de hipótesis para contrastes para Bray I por sitio, fecha y profundidad (7,5-15 cm).

P Bray I (7,5 - 15 cm)								
Sitio	Fecha	Dosis	Contraste	E.E.	F	gl (núm.)	gl (den)	p-valor
Candil	28-05-14	Ct.1	5,8	3,5	2,74	1	6	0,1488
		Ct.2	-2,2	4,52	0,24	1	6	0,6439
		Ct.3	7,87	4,04	3,78	1	6	0,0998
		Total			5,48	3	6	0,374
	12-08-14	Ct.1	0,5	2,34	0,05	1	6	0,8379
		Ct.2	-0,97	3,02	0,1	1	6	0,7599
		Ct.3	0,73	2,7	0,07	1	6	0,7953
		Total			0,52	3	6	0,6823
	23-10-14	Ct.1	3,25	4,21	0,6	1	5	0,475
		Ct.2	0,72	5,13	0,02	1	5	0,8944
		Ct.3	3,1	4,4	0,5	1	5	0,5123
		Total			0,75	3	5	0,5696
Tossi	28-05-14	Ct.1	-1,67	3,27	0,26	1	6	0,6283
		Ct.2	-2,73	4,22	0,42	1	6	0,5411
		Ct.3	-1,47	3,77	0,15	1	6	0,7109
		Total			0,42	3	6	0,7429
	19-08-14	Ct.1	2,33	1,05	4,95	1	6	0,0678
		Ct.2	2,67	1,35	3,88	1	6	0,0964
		Ct.3	0,93	1,21	0,59	1	6	0,4701
		Total			1,81	3	6	0,2448
	23-10-14	Ct.1	-1,73	1,52	1,3	1	6	0,2985
		Ct.2	-1,33	1,97	0,46	1	6	0,523
		Ct.3	-1,87	1,76	1,13	1	6	0,3294
		Total			0,53	3	6	0,6788

San José	29-05-14	Ct.1	1,7	1,24	1,87	1	6	0,2202
		Ct.2	-2,9	1,6	3,27	1	6	0,1206
		Ct.3	4,07	1,43,	9,04	1	6	0,0299
		Total			10,18	3	6	0,0091
NP	28-08-14	Ct.1	2,27	2,61	1,56	1	6	0,2578
		Ct.2	-0,6	3,37	0,03	1	6	0,8647
		Ct.3	5,2	3,02	2,97	1	6	0,1356
		Total			1,77	3	6	0,2521

ANEXO 5. Prueba de hipótesis para contrastes para P Mehlich III por sitio, fecha y profundidad (0-7,5 cm).

P Mehlich III (0-7,5 cm)								
Sitio	Fecha	Dosis	Contraste	E.E.	F	gl (núm.)	gl (den)	p-valor
Candil	28-05-14	Ct.1	74,83	16,48	20,62	1	5	0,0062
		Ct.2	-8,03	21,1	0,14	1	5	0,7191
		Ct.3	95,13	19,78	23,14	1	5	0,0048
		Total			21,1	3	5	0,0029
	12-08-14	Ct.1	13,03	6,25	4,35	1	6	0,082
		Ct.2	6,23	8,06	0,6	1	6	0,4689
		Ct.3	11	7,21	2,33	1	6	0,1781
		Total			2,82	3	6	0,1296
	23-10-14	Ct.1	14,05	4,85	8,38	1	3	0,0628
		Ct.2	0,28	6,32	0,002	1	3	0,9672
		Ct.3	16,64	5,38	9,55	1	3	0,0537
		Total			13,45	3	3	0,0303
Tossi	28-05-14	Ct.1	38,57	5,69	45,88	1	6	0,0005
		Ct.2	15,7	7,35	4,56	1	6	0,0766
		Ct.3	39	6,57	35,19	1	6	0,001
		Total			27,6	3	6	0,0007
	19-08-14	Ct.1	24,83	6,2	16,05	1	6	0,071
		Ct.2	23,43	8	8,58	1	6	0,0263
		Ct.3	11,67	7,16	2,66	1	6	0,1542
		Total			6,92	3	6	0,0225

	23-10-14	Ct.1	12,03	4,29	7,87	1	6	0,031
		Ct.2	8,23	5,54	2,21	1	6	0,1877
		Ct.3	5,93	4,95	1,43	1	6	0,2762
		Total			5,84	3	6	0,0326
San José	29-05-14	Ct.1	13,34	10,5	1,61	1	5	0,2601
		Ct.2	-14,93	13,43	1,24	1	5	0,3167
		Ct.3	22,4	12,72	3,1	1	5	0,1385
		Total			6,85	3	5	0,032
NP	28-08-14	Ct.1	38	6,15	38,12	1	4	0,0035
		Ct.2	-0,4	7,82	0,002	1	4	0,9617
		Ct.3	42,13	7,63	30,46	1	4	0,0053
		Total			39,64	3	4	0,002

ANEXO 6. Prueba de hipótesis para contrastes para P Mehlich III por sitio, fecha y profundidad (7,5-15 cm).

P Mehlich III (7,5 - 15 cm)								
Sitio	Fecha	Dosis	Contraste	E.E.	F	gl (núm.)	gl (den)	p-valor
Candil	28-05-14	Ct.1	2,05	3,63	0,32	1	5	0,5962
		Ct.2	-3,52	4,64	0,57	1	5	0,483
		Ct.3	4,9	4,35	1,27	1	5	0,3112
		Total			1,34	3	5	0,3616
	12-08-14	Ct.1	-1,6	2,31	0,48	1	6	0,5138
		Ct.2	-2,27	2,98	0,58	1	6	0,4753
		Ct.3	-0,53	2,66	0,04	1	6	0,8479
		Total			0,21	3	6	0,8878
	23-10-14	Ct.1	7,13	3,98	3,21	1	6	0,1232
		Ct.2	-1,6	5,14	0,1	1	6	0,766
		Ct.3	8,67	4,59	3,56	1	6	0,1082
		Total			5,68	3	6	0,0346
Tossi	28-05-14	Ct.1	5,1	1,6	10,16	1	6	0,0189
		Ct.2	5,17	2,07	6,26	1	6	0,0464
		Ct.3	4,73	1,85	6,56	1	6	0,0428
		Total			4,54	3	6	0,055

	19-08-14	Ct.1	1,13	1,9	0,36	1	6	0,5728
		Ct.2	2,07	2,45	0,71	1	6	0,432
		Ct.3	0	2,19	0	1	6	>0,9999
		Total			0,25	3	6	0,8572
	23-10-14	Ct.1	-3,97	2,16	3,36	1	6	0,1163
		Ct.2	-4,1	2,79	2,16	1	6	0,1923
		Ct.3	-2,07	2,5	0,68	1	6	0,4396
		Total			1,19	3	6	0,391
San José	29-05-14	Ct.1	6,13	2,83	4,7	1	6	0,0733
		Ct.2	4,33	3,65	1,41	1	6	0,2803
		Ct.3	6	3,27	3,37	1	6	0,1159
		Total			1,77	3	6	0,2523
NP	28-08-14	Ct.1	2,97	0,96	9,55	1	6	0,0214
		Ct.2	0,37	1,24	0,09	1	6	0,7773
		Ct.3	5	1,11	20,36	1	6	0,0041
		Total			7,14	3	6	0,0209

ANEXO 7. Prueba de hipótesis para contrastes para Cítrico por sitio, fecha y profundidad (0-7,5 cm).

P Cítrico (0-7,5 cm)								
Sitio	Fecha	Dosis	Contraste	E.E.	F	gl (núm.)	gl (den)	p-valor
Candil	28-05-14	Ct.1	49,87	13,71	13,24	1	5	0,0149
		Ct.2	-16,07	17,55	0,84	1	5	0,402
		Ct.3	69,47	16,45	17,84	1	5	0,0083
		Total			17,64	3	5	0,0043
	12-08-14	Ct.1	10,36	3,77	7,56	1	5	0,0403
		Ct.2	32	5,34	35,94	1	5	0,0019
		Ct.3	-12,85	4,55	7,98	1	5	0,0369
		Total			16,31	3	5	0,0052
	23-10-14	Ct.1	15,95	5,22	9,34	1	5	0,0282
		Ct.2	12,02	6,68	3,23	1	5	0,1321
		Ct.3	19,9	6,26	10,1	1	5	0,0246
		Total			4,28	3	5	0,0757

Tossi	28-05-14	Ct.1	34,39	4,83	50,64	1	5	0,0008
		Ct.2	25,01	6,18	16,36	1	5	0,0099
		Ct.3	23,45	5,82	16,21	1	5	0,0101
		Total			21,02	3	5	0,0029
	19-08-14	Ct.1	19,13	4,94	15,01	1	6	0,0082
		Ct.2	5,67	6,38	0,79	1	6	0,4083
		Ct.3	22,67	5,7	15,8	1	6	0,0073
		Total			9,5	3	6	0,0107
	23-10-14	Ct.1	8,2	4,49	3,34	1	6	0,1174
		Ct.2	2,73	5,79	0,22	1	6	0,6538
		Ct.3	8	5,18	2,38	1	6	0,1736
		Total			2,5	3	6	0,1569
San José	29-05-14	Ct.1	15,15	3,03	24,93	1	4	0,0075
		Ct.2	4,62	3,89	1,41	1	4	0,3002
		Ct.3	21,24	3,79	31,35	1	4	0,005
		Total			12,31	3	4	0,0173
NP	28-08-14	Ct.1	29,99	8,34	12,92	1	5	0,0156
		Ct.2	11,13	10,67	1,09	1	5	0,3449
		Ct.3	24,25	10,07	5,8	1	5	0,0611
		Total			11,46	3	5	0,0112

ANEXO 8. Prueba de hipótesis para contrastes para P Cítrico por sitio, fecha y profundidad (7,5-15 cm).

P Cítrico (7,5 - 15 cm)								
Sitio	Fecha	Dosis	Contraste	E.E.	F	gl (núm.)	gl (den)	p-valor
Candil	28-05-14	Ct.1	3,67	3,39	1,17	1	6	0,3204
		Ct.2	-6,67	4,37	2,33	1	6	0,178
		Ct.3	-2	3,91	0,26	1	6	0,6272
		Total			1,64	3	6	0,2775
	12-08-14	Ct.1	-3,37	3,15	1,14	1	6	0,3259
		Ct.2	-3,63	4,06	0,8	1	6	0,4057
		Ct.3	-2,2	3,63	0,37	1	6	0,5671
		Total			0,39	3	6	0,7632

	23-10-14	Ct.1	1,67	2,9	0,33	1	6	0,5869
		Ct.2	4,53	3,75	1,46	1	6	0,2722
		Ct.3	-0,67	3,35	0,04	1	6	0,849
		Total			0,81	3	6	0,5341
Tossi	28-05-14	Ct.1	1,93	1,72	1,26	1	6	0,3046
		Ct.2	-0,07	2,22	0,0009	1	6	0,9771
		Ct.3	3,6	1,99	3,28	1	6	0,1203
		Total			1,14	3	6	0,4048
	19-08-14	Ct.1	0,87	1,01	0,73	1	6	0,4245
		Ct.2	0,87	1,31	0,44	1	6	0,5316
		Ct.3	0,53	1,17	0,21	1	6	0,664
		Total			0,25	3	6	0,8604
	23-10-14	Ct.1	-1,6	1,6	1	1	6	0,3565
		Ct.2	-0,47	2,07	0,05	1	6	0,829
		Ct.3	-0,8	1,85	0,19	1	6	0,6805
		Total			1,73	3	6	0,2602
	29-05-14	Ct.1	-0,3	1,58	0,04	1	6	0,8554
		Ct.2	-1,97	2,04	0,93	1	6	0,3713
		Ct.3	2,07	1,82	1,29	1	6	0,2997
		Total			0,79	3	6	0,5432
NP	28-08-14	Ct.1	2,13	1,33	2,57	1	6	0,1599
		Ct.2	0,6	1,72	0,12	1	6	0,7388
		Ct.3	2,93	1,54	3,65	1	6	0,1048
		Total			1,52	3	6	0,3023

ANEXO 9. Resumen de los parámetros (m, b y c) utilizados en el cálculo de la tasa de descenso (TD) en los sitios Candil y Tossi, para el valor de P Bray I determinado en el suelo a tiempo 0 (días) para las dosis de 0, 40, 80 y 120 kg de P_2O_5 ha⁻¹ y el R², considerando la fecha de instalación del ensayo y las fechas de muestreos del suelo.

			P Bray I (ppm) a tiempo 0 (días) para las dosis (kg de P ₂ O ₅ ha. ⁻¹)			
Sitio	Fecha	Parámetros	0	40	80	120
Tossi	4/4/2014		9,500	35,000	53,000	71,000
	28/5/2014		8,067	13,733	15,567	25,000
	12/8/2014		5,667	8,567	12,167	12,767
	23/10/2014		7,400	8,733	10,800	11,733
	4/4/2015		7,000	8,000	11,000	11,000
		m=	9,583	35,009	52,996	70,982
		b=	6,576	8,355	11,352	10,748
		c=	0,019	0,029	0,041	0,026
		R ² =	0,363	0,989	0,938	0,999
Sitio	Fecha	Parámetros	0	40	80	120
Candil	2/4/2014		15,000	33,120	51,700	111,859
	28/5/2014		14,400	18,033	20,233	47,300
	12/8/2014		10,367	16,567	14,800	16,967
	23/10/2014		9,300	9,600	14,867	15,767
	2/4/2015		6,000	11,000	15,000	13,000
		m=	15,461	32,806	51,743	112,136
		b*=	0,000 (11,1)	10,843	14,620	12,929
		c=	0,003	0,016	0,034	0,020
		R ² =	0,937	0,609	0,995	0,999

m= Valor de P lábil a tiempo cero
 b= Valor de P lábil en equilibrio
 c= Coeficiente de fijación de P
 *= Se utilizó el valor promedio de la dosis 0 en las 3 fechas de muestreo