

# **Contribución de fracciones orgánicas de fósforo del suelo al diagnóstico de fertilidad fosfatada en maíz y soja**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias Agropecuarias*

**Stefania Carolina Appelhans**

Ingeniera Agrónoma - Universidad Nacional de Entre Ríos - 2014

Grupo de Recursos Naturales y Factores Abióticos – EEA Paraná - INTA



**FAUBA**

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



## COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

**Octavio Pedro Caviglia**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)  
Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Co-director

**Flavio Hernán Gutiérrez Boem**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)  
Doctor of Philosophy (University of Kentucky)

Consejero de Estudios

**Ricardo José Miguel Melchiori**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)  
Magister Scientae en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

## JURADO DE TESIS

JURADO

**Omar A. Bachmeier**

Ingeniero Agrónomo (Doctor en Ciencias Químicas (Universidad Nacional de Córdoba)  
Doctor en Ciencias Químicas (Universidad Nacional de Córdoba)

JURADO

**Nahuel I. Reussi Calvo**

Ingeniero Agrónomo (Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)  
Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

**Juan A. Galantini**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Sur)  
Doctor en Química Agrícola (Università degli Studi di Bari Aldo Moro)

Fecha de defensa de la tesis: 17 de Marzo de 2020

## Dedicatoria

*A mi familia que siempre me acompaña en todos los desafíos que decido iniciar.*

## **Agradecimientos**

A mis padres y Matias por acompañarme en todo este camino, apoyarme y comprenderme durante todos estos años.

A mi comité consejero: Octavio, Flavio y Ricardo, por estar siempre presentes, aconsejarme, ayudarme con todas mis dudas, por guiarme y demostrar las excelentes personas que son.

A mis compañeros de INTA EEA Paraná, por toda la ayuda en los trabajos de campo, de laboratorio, las infinitas charlas, los mates de cada mañana. A la EEA Paraná por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones.

A mis compañeros de la FCA-UNER, porque siempre estuvieron presentes cuando necesité ayuda.

A Eliana Bressan, por su ayuda y todas las actividades compartidas.

A mis amigos, por entenderme y apoyarme cuando lo necesité.

A todos aquellos que de una forma u otra me ayudaron. Fueron muchas personas que han colaborado para lograr este resultado. A todos ellos, muchas gracias.

## **Declaración**

*Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.*

**Ing. Agr. Stefania Carolina Appelhans**

**Publicaciones derivadas de la Tesis**

Appelhans S.C., Barbagelata P.A., Melchiori R.J.M., Gutierrez Boem F. Assessing soil P fractions changes with long-term phosphorus fertilization related to crop yield of soybean and maize. *Soil Use Manage.* 2020; 00:1–12.  
<https://doi.org/10.1111/sum.12581>

## Índice general

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos .....	iv
Declaración .....	v
Publicaciones derivadas de la Tesis .....	vi
Resumen.....	xv
Capítulo I .....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Fósforo disponible para los cultivos .....	2
1.2. Problemas en el diagnóstico de P en el suelo.....	2
1.3. Fracciones orgánicas y su aporte al P disponible.....	3
1.4. Modificación de las fracciones orgánicas antes cambios en el manejo.....	4
1.5. Relación de las fracciones orgánicas de P y la acumulación de P por los cultivos.....	5
2. Objetivo general: .....	5
Capítulo II .....	7
1. Introducción.....	8
2. Materiales y métodos.....	8
2.1. Sitio experimental .....	8
2.2. Tratamientos y diseño experimental .....	9
2.3. Muestreo y análisis de suelo .....	9
2.4. Mediciones en los cultivos y análisis vegetal.....	10
2.5. Análisis estadísticos .....	10
3. Resultados.....	11
3.1. Fracciones de P del suelo.....	11
3.2. Cambios en las fracciones de P del suelo debido a la fertilización a largo plazo .....	15
3.3. Respuestas de cultivos a la fertilización con P.....	16
3.4. Correlaciones entre las fracciones de P del suelo y variables de los cultivos .....	16
3.5. Relaciones entre las fracciones de P del suelo y los balances acumulados de P.....	18
4. Discusión .....	19
4.4. Las fracciones de P del suelo cambian con la fertilización a largo plazo .....	19
4.5. Nutrición fosfatada de los cultivos.....	20
5. Conclusiones.....	21
Capítulo III.....	23
1. Introducción.....	24
2. Materiales y métodos.....	25
2.1. Sitio experimental .....	25
2.2. Tratamientos y diseño experimental .....	25
2.3. Muestreo y análisis de suelo .....	26
2.4. Mediciones en los cultivos y análisis vegetal.....	26
2.5. Análisis estadísticos .....	26
3. Resultados.....	26
3.1. Características iniciales .....	26
3.2. Efectos de la fertilización en las diferentes secuencias de cultivos .....	28
4. Discusión .....	36
4.1. Características iniciales de los experimentos .....	36
4.2. Efectos de la fertilización en las diferentes secuencias de cultivos .....	36
5. Conclusiones.....	38
Capítulo IV.....	39
1. Introducción.....	40
2. Materiales y métodos:.....	41
2.1. Características de los sitios con cultivos de maíz: .....	41
2.2. Características del sitio con cultivo de soja: .....	45
2.3. Análisis estadístico.....	45
2.3.1. Cultivo de maíz .....	45

2.3.2. Cultivo de soja .....	45
3. Resultados .....	45
3.1. Cultivo de maíz .....	45
3.1.1. Respuesta en rendimiento de maíz a la fertilización fosfatada y las fracciones lábil de P. ....	45
3.1.2. Fracciones de P orgánico lábil en sitios agrupados por su nivel de P-Bray1 y Rendimiento Relativo (cuadrantes 1, 2 y 3 de Cate y Nelson).....	49
3.2. Cultivo de soja .....	50
4. Discusión.....	52
4.1.Cultivo de maíz.....	52
4.2.Cultivo de soja.....	53
5. Conclusiones .....	53
Capítulo V .....	55
Bibliografía.....	62

## Índice de Cuadros

**Cuadro 2.1.** Características del Molisol y Vertisol de los sitios experimentales al inicio de los experimentos (0-20 cm de profundidad). 8

**Cuadro 2.2.** P-Bray1, P total, inorgánico y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, Pi-FF, y Po-FF, respectivamente) y gruesa del suelo (FG) (Pt-FG, Pi-FG, y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic, Pi-Bic, y Po-Bic, respectivamente), luego de un año de la fertilización inicial a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad Muestras de suelo de 2008 para el Molisol, y 2007 para el Vertisol. 11

**Cuadro 2.3.** P-Bray1, P total, inorgánico y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, Pi-FF, y Po-FF, respectivamente) y gruesa del suelo (FG) (Pt-FG, Pi-FG, y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic, Pi-Bic, y Po-Bic, respectivamente), en el Molisol luego de 9 años del inicio del experimento (2016) a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad 12

**Cuadro 2.4.** P-Bray1, P total, inorgánico y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, Pi-FF, y Po-FF, respectivamente) y gruesa del suelo (FG) (Pt-FG, Pi-FG, y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic, Pi-Bic, y Po-Bic, respectivamente), en el Vertisol luego de 9 años del inicio del experimento (2016) a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad 13

**Cuadro 2.5.** Rendimientos (Rend) de maíz y soja, biomasa aérea (Biomasa), concentración de P en grano (P en grano), y P acumulado total ( $P_{\text{acum}}$ ) luego de 9 años de inicio del experimento (2016). 15

**Cuadro 2.6.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las fracciones de P del suelo y las variables de respuesta del cultivo: P-Bray1, P total y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, y Po-FF, respectivamente), en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic y Po-Bic, respectivamente), y el rendimiento (Rend), rendimiento relativo (RR), respuesta en rendimiento (Respuesta), concentración de P en grano (P en grano) y P acumulado total ( $P_{\text{acum}}$ ) del cultivo de maíz y soja a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad. 16

**Cuadro 3.1.** Análisis de varianza, efectos principales e interacciones entre los tratamientos: monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M), fertilizados (+P) y no fertilizados(-P) en: P acumulado total ( $P_{\text{acum}}$ ) de la secuencia de cultivos en 2 años, rendimientos acumulados en 2 años ( $\text{Rend}_{\text{acum}}$ ), P extraído acumulado ( $P_{\text{extacum}}$ ), e índice de cosecha de P (ICP) en 2 años. 28

**Cuadro 3.2.** Análisis de varianza, y efectos principales los tratamientos: monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M), fertilizados (+P) y no fertilizados(-P) en el Molisol y Vertisol a 0-5 cm de profundidad: P-Bray1, P total (Pt-Bic), inorgánico (Pi-Bic), y orgánico (Po-Bic) en extracto de  $\text{NaHCO}_3$ , P total (Pt-FG), inorgánico (Pi-FG), y orgánico (Po-FG) en la fracción gruesa del suelo. 30

**Cuadro 3.3.** Análisis de varianza, y efectos principales los tratamientos: monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M), fertilizados (+P) y no fertilizados(-P) en el Molisol y Vertisol a 0-20 cm de profundidad:

P-Bray1, P total (Pt-Bic), inorgánico (Pi-Bic), y orgánico (Po-Bic) en extracto de  $\text{NaHCO}_3$ , P total (Pt-FG), inorgánico (Pi-FG), y orgánico (Po-FG) en la fracción gruesa del suelo. 31

**Cuadro 3.4.** Valores de los vectores e1 y e2 resultantes del análisis de componentes principales (CP) para el rendimiento acumulado ( $\text{Rend}_{\text{acum}}$ ) y P acumulado total ( $\text{P}_{\text{acum}}$ ) de la secuencia de cultivos en 2 años, P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Po-Bic) en el Molisol y Vertisol, a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad. 33

**Cuadro 4.1.** Características de los sitios, localización y años de los experimentos, subgrupo taxonómico de suelo, propiedades de suelo (0-20 cm): materia orgánica del suelo (MO) y textura (arena, limo y arcilla), pH, P-Bray1, y rendimientos de maíz (Rend) de los tratamientos control. 41

**Cuadro 4.2.** Valores de los vectores e1 y e2 resultantes del análisis de componentes principales (CP) para el rendimiento relativo del maíz ( $\text{RR}_m$ ), pH, materia orgánica del suelo (MO), contenido de arcilla en el suelo (Arcilla), P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Po-Bic). 47

## Índice de figuras

**Figura 2.1.** Porcentaje de cambio de cada tratamiento respecto al tratamiento control (sin aplicación de P) del P-Bray1, P total en la fracción fina del suelo (FF) (Pt-FF), P orgánico en la FF (Po-FF), P total en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG), P orgánico en la FG (Po-FG), P total (Pt-Bic) y orgánico (Po-Bic) en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  en el suelo: a) Molisol a 0-5 cm de profundidad, b) Vertisol a 0-5 cm de profundidad, c) Molisol a 0-20 cm de profundidad, y d) Vertisol a 0-20 cm de profundidad. Referencias: 0 inicial 36 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 0 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 36 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual. 14

**Figura 2.2.** Relación entre el balance aparente acumulado de P (P aplicado como fertilizante – extracción de P por los cultivos) y: a) P-Bray1 (mg kg<sup>-1</sup>), b) P total en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), c) P total en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), y d) P orgánico en FG (Po-FG) (mg kg<sup>-1</sup>) a 0-20 cm de profundidad. Los círculos representan los puntos del Molisol, y los triángulos los del Vertisol. Referencias: : 0 inicial 0 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 0 inicial 36 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 0 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 36 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual. 17

**Figura 3.1.** Contenido de fósforo de diferentes fracciones en el Molisol, en tres secuencias de cultivo, i.e. monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M): a) P total en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic) a 0-5 cm de profundidad, b) Pt-Bic a 0-20 cm de profundidad, c) Pt en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) a 0-5 cm de profundidad, d) Pt-FG a 0-20 cm de profundidad, e) P-Bray1 a 0-5 cm de profundidad, y f) P-Bray1 a 0-20 cm de profundidad 25

**Figura 3.2.** Contenido de fósforo de diferentes fracciones en el Vertisol, en tres secuencias de cultivo, i.e. monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M): a) P total en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic) a 0-5 cm de profundidad, b) Pt-Bic a 0-20 cm de profundidad, c) Pt en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) a 0-5 cm de profundidad, y d) Pt-FG a 0-20 cm de profundidad. 26

**Figura 3.3.** Análisis de componentes principales (ACP). Las diferentes secuencias de cultivo se graficaron en función de las fracciones de P del suelo, las características del suelo y el rendimiento acumulado ( $\text{Rend}_{\text{acum}}$ ) y P acumulado total ( $\text{P}_{\text{acum}}$ ) de las secuencias de cultivo (vectores) en: a) Molisol a 0-5 cm de profundidad, b) Vertisol a 0-5 cm de profundidad, c) Molisol a 0-20 cm de profundidad, y d) Vertisol a 0-20 cm de profundidad. Círculos grandes representan los promedios para cada secuencia de cultivo, círculos pequeños representan los valores individuales de cada secuencia de cultivo.

Los vectores de línea corresponden a  $\text{Rend}_{\text{acum}}$  y  $\text{P}_{\text{acum}}$  de las secuencias de cultivo, P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en la FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Po-Bic). 33

**Figura 4.1.** Localización geográfica de los sitios seleccionados de la red de experimentos de fertilización fosfatada en la región pampeana argentina durante las campañas 2006/07, 2007/08 y 2008/09. 40

**Figura 4.2.** Sitios seleccionados en los cuadrantes 1, 2 y 3 del gráfico de Cate y Nelson de acuerdo con el criterio de selección de un nivel crítico de P-Bray1 de 12 mg kg<sup>-1</sup> (línea vertical) y rendimiento relativo de maíz de 0,90 (Línea horizontal) (Barbagelata, 2011). 42

**Figura 4.3.** Proporción de fósforo inorgánico y orgánico en a) fracción gruesa del suelo (Pi-FG y Po-FG, respectivamente) y b) en extractos de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic y Po-Bic, respectivamente) en los sitios estudiados de la red de fertilización fosfatada de maíz. Contenido de fósforo en c) fracción gruesa del suelo (Pi-FG y Po-FG, respectivamente), y d) extractos de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic y Po-Bic, respectivamente). 44

**Figura 4.4.** Relación entre el contenido de materia orgánica del suelo (MO) (g kg<sup>-1</sup>) y la proporción de P orgánico en el P total (Po / Pt) de la fracción gruesa del suelo (FG). 44

**Figura 4.5.** Relación entre el rendimiento relativo del maíz (RR<sub>m</sub>) y: a) P inorgánico en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), b) P orgánico en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Po-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), c) P total en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), d) P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (Pi-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), e) P orgánico en la fracción gruesa del suelo (Po-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), f) P total en la fracción gruesa del suelo (Pt-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), g) P-Bray1 (mg kg<sup>-1</sup>), h) Pi-Bic + Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>), i) P-Bray1+ Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>). Todas las funciones ajustadas que se muestran fueron significativas ( $p < 0,05$ ). Error<sub>clas</sub> = errores de clasificación. 45

**Figura 4.6.** Análisis de componentes principales (CP). Los sitios agrupados por cuadrantes del método de Cate y Nelson se graficaron en función de las fracciones de P del suelo, las características del suelo y el rendimiento relativo del maíz (vectores). Los vectores de línea corresponden al rendimiento relativo del maíz (RR<sub>m</sub>), pH, materia orgánica del suelo (MO), contenido de arcilla del suelo (arcilla), P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en la FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Po-Bic). Círculos grandes representan los promedios para cada cuadrante, círculos pequeños representan los valores individuales de cada sitio 46

**Figura 4.7.** Promedio de las fracciones de P de los sitios de la red de fertilización fosfatada de maíz agrupados por cuadrantes del método de Cate y Nelson (1, 2 y 3): a) P orgánico en la fracción gruesa del suelo (Po-FG), y b) P-Bray1 más Po-FG. Letras diferentes se refieren a diferencias significativas entre los cuadrantes ( $p < 0,05$ ). 48

**Figura 4.8.** Relaciones entre el rendimiento en grano de soja y las fracciones de P seleccionadas a 0-20 cm de profundidad en el Vertisol: a) P-Bray1 (mg kg<sup>-1</sup>), P total en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), c) P total en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), y d) P orgánico en FG (Po-FG) (mg kg<sup>-1</sup>) e) P-Bray1 más Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>), y f) P inorgánico en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic) más Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>). Todas las relaciones ajustadas fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ). Referencias: 0 inicial 0 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 0 inicial 36 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la

fertilización anual, 200 inicial 0 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 36 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual. 49

**Figura 5.1.** Esquema integrador de los principales resultados de la Tesis 54

**Figura 5.2.** Esquema resumen de los índices sugeridos para el diagnóstico de fertilidad fosfatada del cultivo de maíz. 58

### Abreviaturas

P	Fósforo
P-Bray1	Fósforo extractable según Bray y Kurtz N° 1
FG	Fracción gruesa del suelo
FF	Fracción fina del suelo
C	Carbono
Pt-FG	Fósforo total en la fracción gruesa del suelo
Po-FG	Fósforo orgánico en la fracción gruesa del suelo
Pi-FG	Fósforo inorgánico en la fracción gruesa del suelo
Pt-FF	Fósforo total en la fracción fina del suelo
Po-FF	Fósforo orgánico en la fracción fina del suelo
Pi-FF	Fósforo inorgánico en la fracción fina del suelo
Pt-Bic	Fósforo total en el extracto de NaHCO <sub>3</sub>
Po-Bic	Fósforo orgánico en el extracto de NaHCO <sub>3</sub>
Pi-Bic	Fósforo inorgánico en el extracto de NaHCO <sub>3</sub>
P <sub>acum</sub>	Fósforo acumulado total en la biomasa aérea
RR	Rendimiento relativo
RR <sub>m</sub>	Rendimiento relativo de maíz
RR <sub>s</sub>	Rendimiento relativo de soja
Error <sub>clas</sub>	Errores de clasificación
Rend	Rendimiento
Rend <sub>acum</sub>	Rendimientos acumulados en 2 años de cultivo
P <sub>extacum</sub>	Fósforo extraído acumulado en 2 años
P <sub>res</sub>	Fósforo en los residuos de los cultivos
ICP	Índice de cosecha de fósforo
0 inicial 0 anual	0 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización anual
0 inicial 36 anual	0 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización anual
200 inicial 0 anual	200 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización anual
200 inicial 36 anual	200 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha <sup>-1</sup> en la fertilización anual
S-S	Soja-Soja
T/S	Trigo/Soja
M-M	Maíz-Maíz

## Resumen

### **Contribución de fracciones orgánicas de fósforo del suelo al diagnóstico de fertilidad fosfatada en maíz y soja**

Las fracciones orgánicas lábiles de fósforo (P) del suelo no son tenidas en cuenta en los índices que estiman el P disponible para los cultivos. El índice Bray1 (P-Bray1) es ampliamente utilizado en la región pampeana argentina para estimar la disponibilidad de P del suelo y determinar la probabilidad de respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada. Sin embargo, se han reportado situaciones de cultivos con ausencia de respuesta a la fertilización fosfatada en suelos con bajos contenidos de P-Bray1, lo que podría estar explicado por el aporte de P desde fracciones orgánicas que no son cuantificadas en este índice. El objetivo general de esta tesis es determinar el aporte de las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo ante diferentes dosis de fertilización fosfatada y secuencias de cultivo, y su aporte al diagnóstico de la fertilidad fosfatada en maíz y soja. Se evaluó la variación de las fracciones orgánicas lábiles de P en diferentes secuencias de cultivo y dosis aplicadas de fertilizantes fosfatados en suelos Molisoles y Vertisoles en Entre Ríos, y su relación con la acumulación de P en maíz y soja. Se utilizaron muestras de suelo provenientes de ensayos de fertilización fosfatada en maíz realizados en la Región Pampeana argentina a fin de evaluar la contribución de las fracciones lábiles de P para predecir la respuesta a la fertilización fosfatada. Se determinó el P-Bray1, el P inorgánico y orgánico en extractos de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic y Po-Bic, respectivamente) y en la fracción gruesa (FG) (>53 µm) del suelo (Po-FG y Pi-FG, respectivamente). En el corto plazo, la fertilización fosfatada, sólo modificó las fracciones extractables inorgánicas de P; mientras que en el largo plazo incrementó las fracciones inorgánicas y orgánicas lábiles de P del suelo, cuando los balances aparentes de P fueron positivos en el Molisol, mientras solo incrementó las fracciones inorgánicas de P en el Vertisol. En el largo plazo el Po-FG se incrementó cuando los balances aparentes de P fueron positivos. Las fracciones de P del suelo se modificaron en mayor magnitud en el Molisol que en el Vertisol, tanto con la fertilización fosfatada como con las secuencias de cultivo. Además, se demostró que el Pi y Po en la FG del suelo fueron menos dependientes del tipo de suelo que las fracciones lábiles de P obtenidas con extractantes químicos.

Los índices propuestos que incluyeron el P inorgánico y orgánico lábil, como el P-Bray1 + Po-FG se relacionaron con el rendimiento de soja en el suelo Vertisol en Entre Ríos y con el rendimiento relativo de maíz en la Región Pampeana argentina. Se demostró que las fracciones orgánicas lábiles de P aportaron al P disponible para los cultivos de maíz y soja, y que su consideración permitió disminuir los errores de clasificación de sitios con diferente probabilidad de respuesta a la fertilización respecto al P.

**Palabras clave: fósforo orgánico lábil, respuesta a la fertilización, secuencias de cultivo**

## Abstract

Labile organic phosphorus (P) soil fractions are not considered into indices that estimate available P for crops. The Bray1 index (P-Bray1) is one of the most used indices in the Pampas Region of Argentina to estimate the soil P availability and to determine the probability of crops response to phosphate fertilization. However, it has been reported that under certain conditions there was not crop response to phosphate fertilization in soils with low P-Bray1 contents. It could be associated to the contribution from labile organic P fractions to available P for crops, which are not quantified in this index. The objective of this thesis was to evaluate the contribution of soil labile organic P fractions with different P fertilizer rates and cropping sequences, and their contribution to the diagnosis of phosphate fertilization in corn and soybean. The variation of labile organic fractions of P in different cropping sequences and rates of P fertilizers in Mollisols and Vertisols in Entre Ríos Province (Argentina), and its relationship with P uptake of maize and soybean were evaluated. Also, soil samples from phosphate fertilization trials of corn in the Pampas Region of Argentina were used to evaluate the contribution of these fractions to predict the response to phosphate fertilization. P-Bray1, inorganic and organic P were determined in extracts of  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic and Po-Bic, respectively) and in the soil coarse (CF) ( $> 53 \mu\text{m}$ ) and fine fractions ( $< 53 \mu\text{m}$ ) (Po-FG and Pi-FG, respectively). In the short term, P fertilization only modified the extractable inorganic P fractions. In the long term it increased the labile inorganic and organic P fractions when the apparent P balances were positive in the Mollisol, while only the inorganic P fractions in the Vertisol increased. In the long term, the Po-FG increased when the apparent P balances were positive. Soil P fractions were more modified in the Mollisol than in the Vertisol, both with P fertilization and cropping sequences. In addition, it was shown that Pi and Po in CF were less dependent on soil type than labile P fractions obtained with chemical extractants.

Indices that included the inorganic and labile organic P, such as the P-Bray1 + Po-CF showed a strong relationship with soybean yield in the Vertisol soil of Entre Ríos and with the maize relative yield in the Pampas Region of Argentina. It was shown that labile organic P fractions contributed to available P for corn and soybean crops, and that their inclusion allowed reducing the classification errors of sites with different probability of response to P fertilization.

**Keywords: labile organic phosphorus, response to fertilization, cropping sequences**

# **Capítulo I**

## **Introducción General**

## 1. Introducción

### 1.1. Fósforo disponible para los cultivos

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para el crecimiento de los cultivos, involucrado en el metabolismo energético y la biosíntesis de los ácidos nucleicos y de las membranas celulares de las plantas (Raghothama, 2005; Ziadi et al., 2013). Las plantas absorben el P soluble de la solución del suelo, que se encuentra en equilibrio con formas de P de distinta labilidad y disponibilidad (Stevenson, 1986). La disponibilidad de P en el suelo para los cultivos es relativamente baja en comparación al contenido de P total, ya que se encuentra mayormente en formas insolubles (Beegle, 2005). El P disponible para las plantas es aquel absorbible por sus raíces durante un período de tiempo, como el que ocurre durante el ciclo de crecimiento de un cultivo (Tiessen y Moir, 1993). En general, el nivel de disponibilidad del nutriente en el suelo es estimado a través de la determinación de la concentración de P en extractos de suelo utilizando diferentes extractantes (Bray y Kurtz, 1945; Olsen et al., 1954; Mehlich, 1984). El método de Bray y Kurtz (1945) (P-Bray1) es comúnmente utilizado en la región pampeana argentina para estimar el nivel de P extractable del suelo y la probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada en los cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y soja (*Glicine max* L.).

### 1.2. Problemas en el diagnóstico de P en el suelo

La capacidad de predicción de la respuesta a la fertilización de los cultivos de maíz y soja en base al índice de P-Bray1 resulta errática en algunos suelos de la región pampeana argentina, probablemente debido al aporte de P desde las fracciones orgánicas del suelo que no son cuantificadas por el índice citado (Suñer et al., 2002; Steffens et al., 2010; Ciampitti et al., 2011b). En la región pampeana, las relaciones entre el nivel de P-Bray1 en el suelo y el rendimiento relativo de los cultivos de maíz y soja generalmente muestran ajustes relativamente bajos ( $r^2=0,18$  -  $r^2=0,35$ ) (Melchiori et al., 2008; Gutierrez Boem et al., 2010; Barbagelata, 2011; Appelhans et al., 2016). Valores similares han sido informados en otros estudios conducidos para suelos de Iowa por Mallarino (2003) y Mallarino y Atia (2005).

En varios trabajos se observó un elevado porcentaje de sitios con altos rendimientos relativos de maíz y soja (baja respuesta a la fertilización fosfatada) cuando el nivel de P-Bray1 en el suelo se encontraba por debajo del nivel crítico calibrado para la zona (Mallarino, 2003; Mallarino y Atia, 2005; Heckman et al., 2006; Melchiori et al., 2008; Gutierrez Boem et al., 2010; Barbagelata, 2011). Específicamente para maíz, Heckman et al. (2006) determinaron que entre el 25 y 50% de los sitios evaluados fueron erróneamente clasificados, i.e. mostraron poca a nula respuesta a la fertilización estando por debajo del nivel crítico de P en el suelo. En dichos sitios donde el P-Bray1 no predice adecuadamente la probabilidad de respuesta, estiman que existe alguna fuente adicional de P que aporta al P disponible para los cultivos, y que no es cuantificada por dicho índice (Heckman et al., 2006). Por tal motivo, resulta importante el estudio y la evaluación de métodos complementarios que contemplen fracciones orgánicas lábiles que aporten al P disponible para los cultivos. Las fracciones orgánicas lábiles de P podrían ser utilizadas en los diagnósticos de fertilidad fosfatada especialmente en sistemas en siembra directa, debido a la estratificación del P (Sharpley, 1985; Steffens et al., 2010; Ciampitti et al., 2011b; Wyngaard et al., 2013). En dichos sistemas, el P se encuentra en mayor concentración en los primeros centímetros del suelo debido a la descomposición y reciclaje de los residuos de cultivos en la superficie del suelo (Selles et al., 1995).

Además, se ha reportado que los cultivos de maíz y soja son capaces de utilizar fuentes orgánicas de P del suelo (51-98% del P absorbido) que no son determinadas por las metodologías de diagnóstico actuales (Steffens et al., 2010; Belinque et al., 2015). Establecer con precisión la probabilidad de respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada permitiría optimizar el uso de fertilizantes (Fixen y Grove, 1990) y reducir la probabilidad de excesos de P en suelos agrícolas con importantes beneficios en el contexto ambiental, productivo y económico (McLaren et al., 2014).

### *1.3. Fracciones orgánicas y su aporte al P disponible*

El P del suelo se presenta tanto en formas inorgánicas como orgánicas que, en general, representan un 30-65% del P total de los suelos (Condrón et al., 2005). El P orgánico está compuesto por diversas fracciones, desde las lábiles hasta aquellas resistentes a la mineralización (Hedley et al., 1982). En general, el P liberado de la materia orgánica del suelo contribuye a la disponibilidad de P para el cultivo (Condrón et al., 2005), y este proceso se ha descrito como especialmente importante en suelos con bajo nivel de P inorgánico lábil (Sharpley 1985; Stewart y Sharpley, 1987; Thien y Myers, 1992; Ciampitti et al., 2011b). Boschetti et al. (2003) y Picone et al. (2007) mostraron que las fracciones orgánicas lábiles y moderadamente lábiles de P predominan sobre las fracciones de P inorgánico, especialmente en algunos suelos como Molisoles y Vertisoles de la región pampeana argentina.

Se han reportado numerosos métodos para cuantificar fracciones orgánicas de P y determinar índices de disponibilidad (Hedley et al., 1982; Thien y Myers, 1992; Tiessen et al., 1994; Ciampitti et al., 2011b; Wyngaard et al., 2013). Entre las fracciones orgánicas lábiles de P, está el P total (Pt) y orgánico (Po) de la fracción gruesa del suelo (FG). La FG es la fracción de suelo ( $>53 \mu\text{m}$ ), constituida por arena y por residuos vegetales parcialmente descompuestos, es una fracción lábil y activa de la materia orgánica (también denominada “fracción particulada”) (Cambardella y Elliott, 1992). El P total en la fracción gruesa del suelo (Pt-FG) ha sido reportado como sensible a la fertilización con P en el largo plazo, y se relacionó con el P acumulado ( $P_{\text{acum}}$ ) por el cultivo de maíz hasta la floración (Ciampitti et al., 2011b). Asimismo, ha sido sugerido como un índice de P promisorio para el diagnóstico de disponibilidad de P (Ciampitti et al., 2011b). Sin embargo, resultados recientes han mostrado que el Pt-FG no se relacionó con el rendimiento relativo de soja (Appelhans et al., 2016). Por otra parte, Wyngaard et al. (2016) reportaron que el Po en la FG (Po-FG) resultó un indicador de la mineralización potencial de P orgánico y, por lo tanto, una fuente potencial de P disponible para los cultivos.

En consecuencia, como los estudios previos muestran resultados contradictorios, resulta relevante clarificar si la fertilización de largo plazo con P, evaluada en ensayos de larga duración, induce cambios en el Pt-FG y el Po-FG. Los ensayos de larga duración combinando diferentes dosis y estrategias de fertilización permiten obtener un rango de valores de las diferentes fracciones lábiles de P en un mismo suelo producto de tratamientos previos (diferentes niveles de aportes de P) (Poulton et al., 2013). De esta manera, es posible relacionar las diferencias en la nutrición de un cultivo con la disponibilidad diferencial de las fracciones lábiles de P, tanto inorgánicas como orgánicas. Además, determinar si dichas fracciones están relacionadas con el  $P_{\text{acum}}$  y el rendimiento en grano de los cultivos de soja y maíz. Los ensayos de larga duración permiten relacionar el balance aparente acumulado de P con los cambios en las fracciones lábiles de P (Johnston et al., 2016).

El P extraído por el  $\text{NaHCO}_3$  es considerado otra fracción de P disponible para los cultivos (Tiessen y Moir, 1993; McDowell et al., 2008). Extrae una fracción inorgánica

de P como el P-Bray1, pero también incluye una fracción fácilmente mineralizable de Po (Boschetti et al., 2003). Por ello, es esperable que el Pt extraído con  $\text{NaHCO}_3$  se incremente más que el P-Bray1 con la fertilización con P en el largo plazo. Además, dicha fracción mostró una mayor correlación que el P-Bray1 con el rendimiento del cultivo de soja (Appelhans et al., 2016).

#### *1.4. Modificación de las fracciones orgánicas antes cambios en el manejo*

Las variaciones ambientales (i.e. edafoclimáticas) y de manejo agronómico pueden afectar a las proporciones de fracciones orgánicas lábiles de P del suelo. Así, el contenido de dichas fracciones varía según la región analizada (Steward y Sharpley, 1987; Condrón et al., 1990), el tipo de suelo (Sharpley, 1985; Giuffre et al., 1998; Boschetti et al., 2003), secuencias de cultivos (Abbott, 1977; Suñer et al., 2005; Ciampitti et al., 2011; Damon et al., 2014) y prácticas de fertilización fosfatada (Sharpley, 1985; Giuffre et al., 1998; Ciampitti et al., 2011b, Wyngaard et al., 2013).

Las prácticas de manejo como la fertilización fosfatada modifican las fracciones orgánicas lábiles de P y moderadamente lábiles (Sharpley, 1985). Ciampitti et al. (2011b) mostraron que la fertilización con P aumentó el contenido de P total, especialmente en el horizonte superficial del suelo, debido a los cambios en la cantidad y calidad de los residuos de cultivos aportados y al P aportado como fertilizante. Asimismo, se ha determinado que el Pt-FG es más sensible que el P total en la masa total a cambios inducidos por la fertilización fosfatada (Ciampitti et al., 2011b; Wyngaard et al., 2016).

Los fertilizantes fosfatados pueden aplicarse de acuerdo con diferentes estrategias en sistemas en siembra directa según los objetivos que se persigan, como sólo reponer los nutrientes que se exportan con los cultivos o mantener los niveles de nutrientes del suelo en un determinado valor (Leikman et al., 2010). En los planteos de mantenimiento de los niveles de nutrientes en valores que no limiten la productividad en el largo plazo, es posible aplicar los fertilizantes fosfatados año a año o en una dosis mayor cuando se comienza a aplicar el fertilizante. La aplicación de P en superficie al voleo permite incrementar las dosis de fertilizantes fosfatados a aplicar (Dodd y Mallarino 2005). Debido a la elevada interacción del P con la fase sólida del suelo (Boschetti et al., 1998), es posible aplicar altas dosis de P un año y luego suspender las aplicaciones (Dodd y Mallarino, 2005). En este sentido, la dinámica de las fracciones de P podría ser diferente en el corto y largo plazo, especialmente en aquellas fracciones que dependen del reciclado de nutrientes a través de los residuos de los cultivos.

Asimismo, se ha demostrado que la intensificación de las secuencias de cultivo (i.e. la mayor cantidad de cultivos por unidad de tiempo) aumenta el aporte de residuos de cultivos al suelo (Caviglia et al., 2013; Varela et al., 2014) y, por lo tanto, sería esperable que aumente el aporte de P desde los residuos. Wyngaard et al. (2013) mostraron que la incorporación del cultivo de soja en las secuencias de cultivo, con un bajo aporte de residuos, produjo una reducción en el contenido de C y del Pt-FG. En sistemas donde se ha favorecido el aumento del contenido de materia orgánica del suelo por la implementación de prácticas agronómicas conservacionistas (o sustentables), se ha observado una mayor mineralización de P orgánico (Ziadi et al., 2013). En consecuencia, sería esperable que, en secuencias de cultivo más intensas, es decir con mayor cantidad de cultivos por año, aumenten las fracciones orgánicas de P y de esta manera la disponibilidad de P para los cultivos. La composición de las secuencias de cultivo, i.e. cultivos de gramíneas o leguminosas, también modifica la dinámica de los residuos debido a su diferente calidad (relación C/P, Buchanan y King, 1993). La fertilización fosfatada también permite incrementar la productividad de las secuencias

de cultivo y los aportes de residuos, y podría modificar la dinámica de las fracciones de P en el corto y largo plazo.

El aporte del P proveniente de los residuos de cosecha o de fertilizantes fosfatados al P disponible para los cultivos puede diferir significativamente entre suelos con diferente productividad y capacidad de retención del P. La productividad de los Molisoles es mayor que la de los Vertisoles (Tasi, 2009), lo que afecta el aporte de residuos de los cultivos al suelo. Por otro lado, el aporte de P desde fracciones orgánicas lábiles a la disponibilidad de P para los cultivos podría ser menor en los Vertisoles que en los Molisoles, debido a su mayor capacidad de retención del P (Boschetti et al., 1998). Dadas las características de dichos suelos, se estima que la magnitud de los cambios en las fracciones orgánicas de P del suelo inducidos por secuencias de cultivo o por la fertilización fosfatada, sea mayor en los Molisoles que en los Vertisoles.

#### *1.5. Relación de las fracciones orgánicas de P y la acumulación de P por los cultivos*

Se han realizado pocos avances en establecer la relación entre el aporte de fracciones orgánicas de P y la nutrición de los cultivos. Por ejemplo, se ha reportado en suelos sin fertilización una asociación entre el  $P_{\text{acum}}$  en soja y el  $P_o$  extraído con  $\text{NaHCO}_3$  (Linguist et al., 1997). Asimismo, se han reportado asociaciones entre el  $P_{\text{t-FG}}$  y el  $P_{\text{acum}}$  hasta floración en el cultivo de maíz a R1 (Ciampitti et al., 2011b), y en el cultivo de arroz (Wei et al., 2016). Sin embargo, la relación entre las demás fracciones orgánicas de P y la acumulación del nutriente en los cultivos de maíz y soja ha sido poco explorada. Debido a las pocas evidencias mencionadas de que existe un aporte de P desde algunas fracciones orgánicas lábiles del suelo al  $P_{\text{acum}}$  por los cultivos de maíz y soja, sería esperable que, para niveles similares de P Bray1, una mayor proporción de dichas fracciones contribuya a una mayor acumulación de P por dichos cultivos. Es de prever que si se logran establecer las relaciones entre las fracciones orgánicas lábiles de P y la nutrición de los cultivos, mejorará el entendimiento de la dinámica del P en el suelo para optimizar las prácticas de manejo nutricional en maíz y soja.

## **2. Objetivo general:**

Determinar el aporte de las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo ante diferentes dosis de fertilización fosfatada y secuencias de cultivo, y su aporte al diagnóstico de la fertilidad fosfatada en maíz y soja.



## **Capítulo II**

# **Evaluación del efecto de la fertilización con P en las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo en relación con la nutrición de los cultivos de maíz y de soja**

## 1. Introducción

Las fracciones orgánicas lábiles de P se han medido en suelos con diferentes texturas, tratamientos de fertilización y secuencias de cultivos (Boschetti et al., 2003; McDowell et al., 2008; Wyngaard et al., 2013; Appelhans et al., 2016), pero no se han relacionado con variables de nutrición fosfatada en los cultivos de soja y maíz en condiciones de fertilización a largo plazo y con diferentes estrategias de fertilización. Cuando se fertiliza al voleo en sistemas en siembra directa, es posible aplicar mayores dosis de P que en la línea de siembra, posibilitando una estrategia de fertilización basada en aplicar altas dosis de P en un año y luego suspender las aplicaciones, además de la estrategia de fertilización anual con menores dosis de P (Dodd y Mallarino 2005).

La inclusión de fracciones orgánicas lábiles de P en los análisis de rutina para estimar la disponibilidad de P podría mejorar las recomendaciones de fertilización actuales (McDowell et al., 2008; Dodd y Sharpley, 2015; Appelhans et al., 2016). En este sentido, la evaluación de los cambios de las fracciones de P con la fertilización a largo plazo podría ser útil para seleccionar las fracciones de P, incluido el  $P_o$ , que podrían estar relacionadas con el rendimiento en grano de los cultivos.

En los suelos Vertisoles las arcillas esmectíticas pueden proteger la materia orgánica de la mineralización (Fabrizzi et al., 2009), y además retener en mayor medida el P de fertilizantes (Boschetti et al., 1998, Quinteros et al., 2003). Por lo cual, es esperable que el impacto de la fertilización fosfatada en las fracciones orgánicas lábiles de P pueda ser menor en un suelo Vertisol respecto a un Molisol.

Se hipotetiza que: (i) las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo a) se incrementan con la fertilización fosfatada en el largo plazo cuando el balance aparente de P es positivo, b) son menos afectadas por la fertilización fosfatada en un suelo Vertisol que en un suelo Molisol, (ii) las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo se relacionan positivamente con: a) el  $P_{acum}$ , b) el balance aparente acumulado de P, c) la concentración de P en grano, y d) el rendimiento en grano, de los cultivos de soja y maíz.

Los objetivos de este capítulo fueron evaluar en un Molisol y en un Vertisol:

- ✓ el cambio de las fracciones de P del suelo con la fertilización con P en el largo plazo,
- ✓ la relación entre las fracciones de P con el balance aparente acumulado de P, la concentración de P en grano, el  $P_{acum}$ , y el rendimiento en grano de los cultivos de soja y maíz.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en dos ensayos de fertilización con P de largo plazo establecidos en el año 2006 y 2007 en dos suelos contrastantes de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná de INTA, Entre Ríos, Argentina (31°50,9' S; 60°32,3' W). Los suelos de los sitios experimentales fueron descriptos como del orden Molisol y Vertisol. El Molisol es Serie Tezanos Pinto (Argiudol ácuico fino, mixto, térmico), y el Vertisol es Serie Febré (Hapluderte crómico, fino, ligeramente alcalino, térmico) (Soil Survey Staff, 2014). En el Molisol, la secuencia de cultivos incluyó trigo (*Triticum aestivum* L.) / soja como doble cultivo, seguidos de maíz, mientras que, en el Vertisol, la secuencia de cultivos fue trigo/soja como doble cultivo, maíz, y soja. El clima de la región es templado (temperatura anual promedio  $\approx 18,3$  °C) y húmedo (precipitación  $\approx 1000$  mm).

## 2.2. Tratamientos y diseño experimental

En cada sitio experimental los tratamientos evaluados fueron una combinación de dos dosis de fertilización inicial con P (0 y 200 kg P ha<sup>-1</sup>), con dos dosis de fertilización anual con P (0 y 36 kg P ha<sup>-1</sup>) aplicados como superfosfato triple de calcio (0-20-0). Los cuatro tratamientos evaluados en 2016 fueron: 0-0, 0-36, 200-0, 200-36 kg P ha<sup>-1</sup>. Estos cuatro tratamientos fueron dispuestos en un diseño en bloques completos aleatorizados en parcelas divididas, con cuatro repeticiones. Las dosis de fertilización inicial fueron asignadas a las parcelas mayores (9,2 m de ancho por 24 m de largo), y las dosis anuales de fertilización con P a las subparcelas (4,8 m de ancho por 24 m de largo). La dosis de fertilización inicial fue aplicada al voleo a mano en junio de 2006 en el Vertisol, y en 2007 en el Molisol. La dosis anual de fertilización con P fue aplicada al voleo a mano en junio cada año para los dos suelos y comenzó a aplicarse en 2007 en ambos sitios.

## 2.3. Muestreo y análisis de suelo

El muestreo de suelos para caracterizar los sitios experimentales fue realizado antes de la fertilización con P en junio de 2006 y 2007 para el Vertisol y Molisol, respectivamente (Cuadro 1). Las muestras de suelo fueron secadas al aire, molidas, y tamizadas a 2 mm. En cada muestra de suelo se determinó pH (Van Lierop, 1990), textura (Gee y Bauder, 1986), contenido de carbono (C) orgánico (Walkley y Black, 1934), y P-Bray1 (Bray y Kurtz, 1945) (Cuadro 1).

**Cuadro 2.1.** Características de los suelos del orden Molisol y Vertisol de los sitios experimentales al inicio de los experimentos (0-20 cm de profundidad).

Suelo	pH	Arcilla .....%.....	Limo	Arena	C g kg <sup>-1</sup>	P-Bray1 mg kg <sup>-1</sup>
Molisol	6,3	32,4	65,7	1,9	15,9	21,1
Vertisol	7,4	42,8	51,6	5,6	20,3	7,2

El muestreo de suelo también se realizó después de un año de la fertilización inicial con P (2007 en el Vertisol y 2008 en el Molisol), y en 2016, luego de 9 años de fertilización anual con P. Se colectaron muestras compuestas (15-20 piques) en cada unidad experimental a dos profundidades, 0-5 cm y 5-20 cm. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, molidas, y tamizadas a 2 mm, y se determinó el P-Bray1, y P total, orgánico, e inorgánico en extractos de NaHCO<sub>3</sub>.

El P inorgánico y orgánico fue extraído agitando 4 g de suelo con 40 ml de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M por 30 min (relación 1:10 suelo:solución) (Thien y Myers, 1992). El P inorgánico (Pi-Bic) en el extracto centrifugado fue determinado por colorimetría a 882 nm (Murphy y Riley, 1962). El P total extractable (Pt-Bic) fue determinado por digestión ácida con persulfato de amonio por 1h a 150 °C (Bowman, 1989), y el contenido de P en el digesto se determinó por colorimetría. El P orgánico (Po-Bic) fue calculado por diferencia entre el Pt-Bic y el Pi-Bic, como Po-Bic = (Pt-Bic) – (Pi-Bic).

La fracción fina y gruesa del suelo fueron determinadas mediante el procedimiento descrito por Cambardella y Elliott (1992) modificado para evitar la adición de P, utilizando 2 bolitas de vidrio como agente dispersante (Irizar et al., 2010). Brevemente, 10 g de cada muestra de suelo se agitaron con 2 bolitas de vidrio y 30 ml de agua destilada por 16 h a 180 rpm. Luego, la fracción de suelo que pasó a través de un tamiz de 53 µm [fracción fina de suelo (FF)] fue secada a 105 °C por 48 h, y homogeneizada a mano con un mortero. La fracción de suelo sobre el tamiz [fracción gruesa de suelo (FG)] fue colectada, secada, homogeneizada y molida a mano. Para determinar el P

inorgánico en cada una de las fracciones (Pi-FF, y Pi-FG, respectivamente), se realizó una extracción con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5 M por 16 h, se centrifugó, y se midió el contenido de P en el sobrenadante por colorimetría. El P total en FF y FG (Pt-FF, y Pt-FG, respectivamente) fue determinado por el método de ignición (Kuo, 1990), y el P orgánico en FF y FG (Po-FF, y Po-FG, respectivamente) fue calculado como la diferencia entre el Pt y el Pi de cada fracción de suelo. Los valores de P de cada fracción a 0-20 cm de profundidad fueron calculados como el promedio ponderado de los valores obtenidos de las muestras de suelo a 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad. Se evaluaron las fracciones de P a 0-5 cm de profundidad debido a que se espera que sea sensible a los cambios en el manejo ya que recibe el P aplicado al voleo y la mayor parte de los residuos vegetales; y a 0-20 cm debido a que es la profundidad comúnmente utilizada para el diagnóstico de la fertilidad fosfatada del suelo.

#### 2.4. Mediciones en los cultivos y análisis vegetal

En el año 2016, en el Molisol había un cultivo de maíz y en el Vertisol un cultivo de soja. La biomasa aérea de los cultivos de soja de primera y del maíz fue medida muestreando un área de  $1 \text{ m}^2$  en cada subparcela en madurez fisiológica. El rendimiento en grano de los cultivos de soja, maíz y trigo en la rotación fueron determinados con una cosechadora experimental en  $12 \text{ m}^2$  en cada subparcela, y fue corregido por humedad a 145, 135, y  $140 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente. Tanto las muestras de biomasa aérea como de granos fueron secadas a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  y molidas a 1 mm. El contenido de P en la biomasa aérea y granos fue determinado por colorimetría después de una digestión con  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  (Kuo, 1990).

El rendimiento relativo de soja y maíz (RR) fue calculado como la proporción entre el rendimiento en grano de cada tratamiento y el rendimiento en grano del tratamiento con la máxima dosis de P ( $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de P inicial y  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de P anualmente). La respuesta en grano (Respuesta) de los cultivos a la fertilización con P fue calculada como la diferencia entre el rendimiento en grano de cada tratamiento y el rendimiento del tratamiento control (no fertilizado con P).

El balance aparente acumulado de P en el largo plazo fue calculado sumando los balances de P anuales. En cada año, el balance aparente de P fue calculado como la diferencia entre la cantidad de P agregada como fertilizante a los cultivos y el P exportado en los granos. La exportación de P en los granos ( $P_{\text{acum}}$ ) fue calculada como el producto del rendimiento en grano de cada cultivo en base seca y la concentración de P en grano de dicho cultivo. La concentración de P en grano (P en grano) en cada tratamiento fue determinada en 2016 para los cultivos de soja y maíz, y en 2017 para el cultivo de trigo, y estos valores promedio para cada tratamiento en cada sitio fueron utilizados para estimar el P exportado en los granos en cultivos previos. El contenido de P en granos de trigo fue medido en 2017 para determinar el P acumulado total por la secuencia de cultivos de cada sitio. Los datos del cultivo de trigo se utilizaron para el cálculo de los balances aparentes de P en el largo plazo, puesto que las secuencias de cultivo de dichos ensayos incluyen el cultivo de trigo.

#### 2.5. Análisis estadísticos

Los datos obtenidos fueron analizados mediante ANOVA, y las medias de los tratamientos fueron comparadas mediante la prueba LSD ( $\alpha=0.05$ ). Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Los cambios de las fracciones de P con la fertilización con P a largo plazo se calcularon como la diferencia entre el valor de cada fracción de P en cada tratamiento y el valor de la misma fracción de P en el tratamiento de control (sin P agregado), expresado como

un porcentaje de cambio. Estos cambios se calcularon para el Vertisol y el Molisol a dos profundidades de muestreo del suelo, 0-5 cm y 0-20 cm. Los coeficientes de correlación de Pearson fueron determinados para las fracciones: P-Bray1, Pt-FG, Po-FG, Pt-Bic, Po-Bic, Pt-FF, and Po-FF a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad, y el rendimiento en grano, RR, Respuesta, P en grano, y  $P_{acum}$  para los cultivos de soja y maíz. Las relaciones entre el balance acumulado de P y el P-Bray1, Pt-FG, Po-FG y Pt-Bic fueron evaluadas mediante regresiones lineales en cada suelo. Se compararon los parámetros de cada función lineal para cada suelo y entre fracciones de P en un mismo suelo mediante una prueba F (Mead et al., 1993).

### 3. Resultados

#### 3.1. Fracciones de P del suelo

Después de sólo un año, la fertilización inicial con P aumentó principalmente las fracciones de P inorgánico (Cuadro 2.2). El P-Bray1 aumentó significativamente en ambas profundidades para ambos suelos. La fertilización inicial no cambió significativamente el Po-FF, el Po-FG y el Po-Bic a ambas profundidades en el Molisol y el Vertisol, excepto Po-Bic a 0-5 cm en el Vertisol que aumentó ( $p < 0,05$ ). El P total en FF y Pt-Bic aumentó con la fertilización con P en ambas profundidades en los dos suelos. Sin embargo, el Pt-FG sólo aumentó en el Molisol a una profundidad de 0-5 cm.

Las muestras de suelo tomadas después de la fertilización continua con P a largo plazo no mostraron interacción entre el efecto de la fertilización con P inicial y anual (Cuadro 2.3 y 2.4), excepto Po-FG a una profundidad de 0-5 cm en el Molisol (Cuadro 2.3), y Pt-FG en el Vertisol a una profundidad de 0-20 cm (Cuadro 2.4). La concentración de P-Bray1 aumentó con la fertilización anual a ambas profundidades de muestreo en el Molisol y el Vertisol (Cuadro 2.3 y 2.4), y la fertilización inicial sólo aumentó el P-Bray1 en el Molisol a una profundidad de 0-20 cm (Cuadro 2.3).

En el Molisol, la fertilización inicial con P no afectó ninguna fracción de Po en ambas profundidades, pero la mayoría de las fracciones de Po aumentaron significativamente con la fertilización anual con P (Cuadro 2.3). Las fracciones de Pt, que incluyen Po y Pi, aumentaron significativamente con la fertilización anual en ambas profundidades, excepto el Pt-FF a 0-5 cm, mientras que la fertilización inicial sólo aumentó el Pt-Bic. En cambio, en el Vertisol, la fertilización inicial y anual con P no afectó a las fracciones de Po, a excepción del Po-Bic que aumentó a una profundidad de 0-5 cm (Cuadro 2.4). La fertilización inicial sólo aumentó el Pt-FF y el Pt-FG a una profundidad de 0-5 cm, y el Pt-FG a una profundidad de 0-20 cm. Sin embargo, la fertilización anual aumentó todas las fracciones totales de P.

**Cuadro 2.2.** P-Bray1, P total, inorgánico y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, Pi-FF, y Po-FF, respectivamente) y gruesa del suelo (FG) (Pt-FG, Pi-FG, y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic, Pi-Bic, y Po-Bic, respectivamente), luego de un año de la fertilización inicial a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad Muestras de suelo de 2008 para el Molisol, y 2007 para el Vertisol.

Suelo y profundidad	Dosis de P kg ha <sup>-1</sup>	P-Bray1	Pt-FF	Pi-FF	Po-FF	Pt-FG	Pi-FG	Po-FG	Pt-Bic	Pi-Bic	Po-Bic
		.....mg kg <sup>-1</sup> .....									
<b>MOLISOL</b>	0	51,7 b†	471 b	271 b	200	47,5 b	28 b	19,3	31,3 b	28,4 b	2,93
	200	150 a	664 a	463 a	201	73,5 a	52 a	21,5	73,1 a	70,0 a	3,13
0-20 cm	0	22,2 b	365 b	174 b	159	30,5	17,8	12,8	18,3 b	15,2 b	3,10
	200	54,8 a	427 a	268 a	189	35,5	22,8	12,8	32,5 a	28,7 a	3,80
<b>VERTISOL</b>											
0-5 cm	0	15,2 b	258 b	90 b	168	27,3	13,0	14,3	12,0 b	10,9 b	1,18 b
	200	45,8 a	411 a	224 a	187	79,5	65,3	14,5	24,5 a	22,3 a	2,15 a
0-20 cm	0	5,9 b	218 b	48 b	170	17,5	8,3	8,0	8,2 b	6,4 b	1,85
	200	15,9 a	264 a	94 a	170	31,0	23,0	9,0	12,1 a	9,8 a	2,35

† Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos para las variables ( $p < 0,05$ ).

**Cuadro 2.3.** P-Bray1, P total, inorgánico y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, Pi-FF, y Po-FF, respectivamente) y gruesa del suelo (FG) (Pt-FG, Pi-FG, y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic, Pi-Bic, y Po-Bic, respectivamente), en el Molisol luego de 9 años del inicio del experimento (2016) a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad

Profundidad	Tratamiento	Dosis kg ha <sup>-1</sup>	P-Bray1	Pt -FF	Pi-FF	Po-FF	Pt -FG	Pi-FG	Po-FG	Pt -Bic	Pi-Bic	Po-Bic
			.....mg kg <sup>-1</sup> .....									
0-5 cm	Fertilización inicial	0	57,0 a†	562	302 b	249	60,0	32,0	22,2 c	31,4 b	28,1 b	2,9
		200	74,9 a	582	387 a	281	67,2	39,3	33,8 a	41,8 a	38,9 a	3,3
	Fertilización anual	0	55,1 b	565	299 a	263	48,5 b	24,1 b	26,7 bc	30,7 b	28,5 a	2,2 b
		36	76,9 a	580	389 a	267	78,7 a	47,2 a	29,3 ab	42,5 a	38,5 a	4,0 a
0-20 cm	Fertilización inicial	0	25,3 b	420	201 b	219	28,3	16,1	12,3	15,0 b	12,7 b	2,2
		200	34,9 a	472	237 a	235	32,5	19,6	14,1	21,0 a	18,8 a	2,3
	Fertilización anual	0	24,5 b	418 b	199 b	219 b	24,2 b	13,3 b	11,0 b	14,5 b	12,8 b	1,7 b
		36	35,7 a	474 a	239 a	235 a	36,6 a	22,4 a	15,4 a	21,5 a	18,6 a	2,8 a

† Letras diferentes indican efecto principal significativo para la fertilización inicial o anual ( $p < 0,05$ ), y letras en negrita se refieren a diferencias significativas para las variables que mostraron interacción de la Fertilización inicial x fertilización anual.

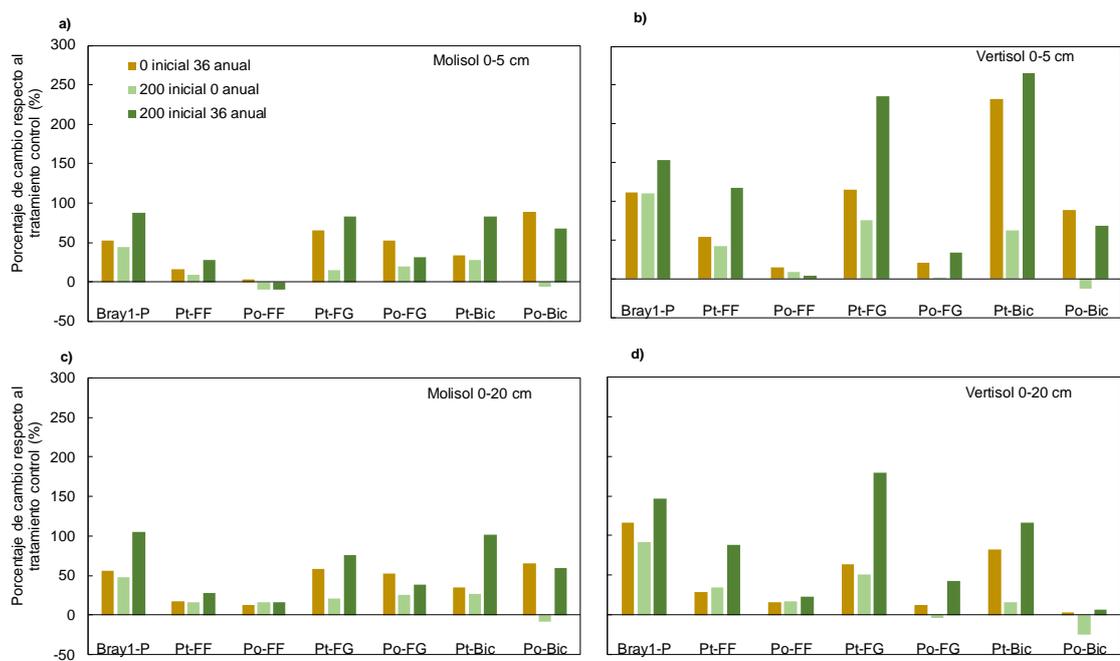
**Cuadro 2.4.** P-Bray1, P total, inorgánico y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, Pi-FF, y Po-FF, respectivamente) y gruesa del suelo (FG) (Pt-FG, Pi-FG, y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic, Pi-Bic, y Po-Bic, respectivamente), en el Vertisol luego de 9 años del inicio del experimento (2016) a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad

Profundidad	Tratamiento	Dosis kg ha <sup>-1</sup>	P-Bray1	Pt-FF	Pi-FF	Po-FF	Pt -FG	Pi-FG	Po-FG	Pt-Bic	Pi-Bic	Po-Bic
			.....mg kg <sup>-1</sup> .....									
0-5 cm	Fertilización inicial	0	20,2	350 b	119 b	229	51,7 b	29,3 b	22,4	15,2	12,0	3,2
		200	30,1	496 a*	268 a	231	83,9 a	60,1 a	23,9	18,6	15,8	2,9
	Fertilización anual	0	20,2	335 b	110 b	224	45,3 b	24,9 b	20,4	9,2 b	7,2 b	2,1 b
		36	30,2	512 a	276 a	236	90,4 a	64,5 a	25,9	24,5 a	20,6 a	4,0 a
0-20 cm	Fertilización inicial	0	8,3	235	56	178	15,4 <b>c</b>	10,6 a	9,8	6,5	4,9	1,5
		200	11,5	331	132	198	25,3 <b>b</b>	22,2 b	10,4	7,7	6,2	1,6
	Fertilización anual	0	7,7 b†	241 b	61 a	179	23,3 <b>bc</b>	10,4 a	9,0	5,0 b	3,6 b	1,4
		36	12,2 a	325 a	127 b	197	42,9 <b>a</b>	22,4 b	11,2	9,2 a	7,5 a	1,7

† Letras diferentes indican efecto principal significativo para la fertilización inicial o anual ( $p < 0,05$ ), y letras en negrita se refieren a diferencias significativas para las variables que mostraron interacción de la Fertilización inicial x fertilización anual.

### 3.2. Cambios en las fracciones de P del suelo debido a la fertilización a largo plazo

Los cambios relativos de las fracciones de P del suelo que incluyen P orgánico, P total y el P-Bray1 con los diferentes tratamientos de fertilización con P se muestran en la Figura 2.1. A una profundidad de 0-5 cm, las tres fracciones de P del suelo que más aumentaron con la fertilización fueron el P-Bray1, el Pt-FG y el Pt-Bic en ambos suelos. Se observaron resultados similares a una profundidad de 0-20 cm. Para los dos suelos, el cambio relativo de las fracciones de P fue mayor a una profundidad de 0-5 cm en comparación con una profundidad de 0-20 cm y osciló entre -7 a 89% y 13 a 266% en el Molisol y el Vertisol, respectivamente. A una profundidad de 0-20 cm, el cambio relativo de las fracciones de P varió de -9 a 110% en el Molisol y de -25 a 179% en el Vertisol. Los cambios relativos de las fracciones de P debidos a la fertilización fueron mayores en el Vertisol que en el Molisol. Los valores negativos de los cambios se obtuvieron principalmente para Po-Bic a ambas profundidades en los dos suelos para el tratamiento con 200 kg ha<sup>-1</sup> de P inicial y 0 kg ha<sup>-1</sup> de P anual.



**Figura 2.1.** Porcentaje de cambio luego de 9 años de cada tratamiento respecto al tratamiento control (sin aplicación de P) del P-Bray1, P total en la fracción fina del suelo (FF) (Pt-FF), P orgánico en la FF (Po-FF), P total en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG), P orgánico en la FG (Po-FG), P total (Pt-Bic) y orgánico (Po-Bic) en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> en el suelo: a) Molisol a 0-5 cm de profundidad, b) Vertisol a 0-5 cm de profundidad, c) Molisol a 0-20 cm de profundidad, y d) Vertisol a 0-20 cm de profundidad. Referencias: 0 inicial 36 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 0 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 36 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual.

### 3.3. Respuestas de cultivos a la fertilización con P

En el Cuadro 2.5 se muestra que el efecto de la fertilización inicial pasados 9 años, no afectó ninguna de las variables respuesta medidas en los cultivos de maíz y de soja. Sin embargo, la fertilización anual con P en el largo plazo aumentó la biomasa aérea del maíz y, en consecuencia, el  $P_{acum}$  se incrementó en  $10,7 \text{ kg ha}^{-1}$ . Para el cultivo de soja, la fertilización anual con P también incrementó el rendimiento en un 50%, la biomasa aérea y la concentración de P en grano en un 34%, y el  $P_{acum}$  en un 87%.

**Cuadro 2.5.** Rendimientos (Rend) de maíz y soja, biomasa aérea (Biomasa), concentración de P en grano (P en grano), y P acumulado total ( $P_{acum}$ ) luego de 9 años de inicio del experimento (2016).

Cultivo y suelo	Tratamiento	Dosis de P kg ha <sup>-1</sup>	Rend kg ha <sup>-1</sup>	Biomasa kg ha <sup>-1</sup>	P en grano mg g <sup>-1</sup>	$P_{acum}$ kg P ha <sup>-1</sup>
Maíz	Fertilización inicial	0	11773	20422	4,1	51,5
		200	11971	22383	4,4	52,2
Molisol	Fertilización anual	0	11653	19603 b	4,1	46,5 b
		36	12091	23202 a	4,4	57,2 a
Soja	Fertilización inicial	0	3344	7323	4,2	17,7
		200	3672	8738	4,7	22,4
Vertisol	Fertilización anual	0	2810 b†	6877 b	3,8 b	13,8 b
		36	4206 a	9185 a	5,1 a	25,8 a

†Letras diferentes indican efecto principal significativo para la fertilización inicial o anual (LSD,  $p < 0,05$ )

### 3.4. Correlaciones entre las fracciones de P del suelo y variables de los cultivos

Los coeficientes de correlación entre las fracciones de P en el suelo y las variables de los cultivos se muestran en el Cuadro 2.6 para el maíz y la soja, para lo cual solo se consideraron fracciones de P más afectadas por la fertilización con P e incluyeron P orgánico (Figura 2.1). En el Molisol, sólo a 0-20 cm de profundidad el Pt-FG se correlacionó significativamente con la respuesta en rendimiento en grano a la fertilización con P, y el Po-FG con el rendimiento del maíz, la respuesta en rendimiento en grano y el  $P_{acum}$ . En soja, el P-Bray1, el Pt-FF, el Pt-FG, el Pt-Bic y el Po-Bic a una profundidad de 0-5 cm se correlacionaron significativamente con el rendimiento de grano, el RR, P en grano y el  $P_{acum}$ . A una profundidad de 0-20 cm, el P-Bray1, el Pt-FG, el Po-FG y el Pt-Bic se correlacionaron con el rendimiento de grano de soja, el RR y el P en grano. La respuesta en rendimiento en grano de soja sólo se correlacionó con Pt-FG, mientras que el  $P_{acum}$  de soja se correlacionó significativamente con el P-Bray1, el Pt-FG y el Pt-Bic.

**Cuadro 2.6.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las fracciones de P del suelo y las variables de respuesta del cultivo: P-Bray1, P total y orgánico en la fracción fina (FF) (Pt-FF, y Po-FF, respectivamente), en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG y Po-FG, respectivamente) y en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic y Po-Bic, respectivamente), y el rendimiento (Rend), rendimiento relativo (RR), respuesta en rendimiento (Respuesta), concentración de P en grano (P en grano) y P acumulado total (P<sub>acum</sub>) del cultivo de maíz y soja a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad.

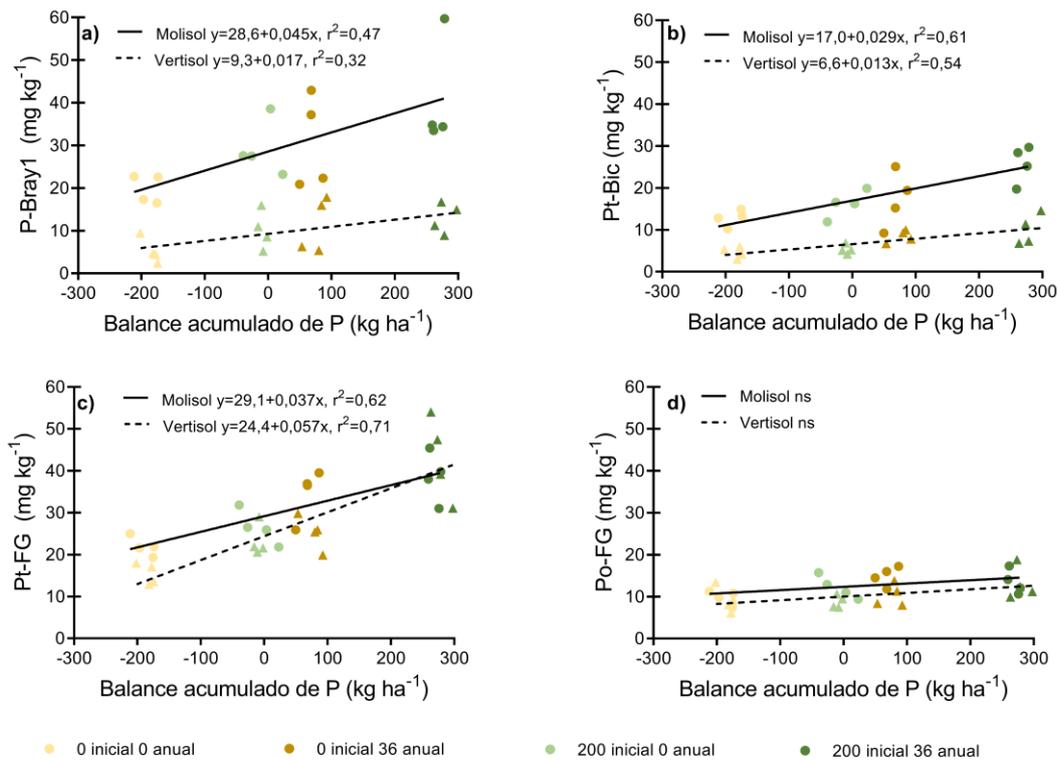
0-5 cm	Maíz (Molisol)					Soja (Vertisol)				
	Rend	RR	Respuesta	P en grano	P <sub>acum</sub>	Rend	RR	Respuesta	P en grano	P <sub>acum</sub>
P-Bray1	-0,40	-0,42	-0,22	0,11	0,03	<b>0,57</b>	<b>0,57</b>	0,25	<b>0,58</b>	<b>0,65</b>
Pt-FF	0,05	0,22	0,1	-0,14	0,24	<b>0,69</b>	<b>0,62</b>	<b>0,62</b>	<b>0,73</b>	<b>0,65</b>
Po-FF	0,07	-0,19	-0,13	-0,34	0,11	0,15	0,18	0,42	0,12	0,08
Pt-FG	0,12	0,11	0,23	0,14	0,39	<b>0,67</b>	<b>0,61</b>	<b>0,71</b>	<b>0,65</b>	<b>0,68</b>
Po-FG	0,02	-0,03	0,15	0,36	0,4	0,39	0,39	-0,05	0,27	0,25
Pt-Bic	-0,04	0,45	0,14	0,02	0,24	<b>0,78</b>	<b>0,79</b>	0,48	<b>0,73</b>	<b>0,75</b>
Po-Bic	0,13	-0,13	0,18	0,14	0,46	<b>0,61</b>	<b>0,66</b>	0,31	<b>0,57</b>	<b>0,53</b>
0-20 cm										
P-Bray1	-0,29	-0,32	-0,16	0,04	0,09	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	0,31	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>
Pt-FF	0,25	0,03	0,27	0,04	0,33	0,45	0,36	0,24	<b>0,51</b>	0,26
Po-FF	0,38	-0,19	0,21	-0,03	0,32	0,42	0,32	0,23	0,39	0,09
Pt-FG	0,39	0,21	<b>0,50</b>	0,31	0,25	<b>0,61</b>	<b>0,53</b>	<b>0,64</b>	<b>0,64</b>	<b>0,58</b>
Po-FG	<b>0,64</b>	0,18	<b>0,65</b>	0,42	<b>0,52</b>	<b>0,60</b>	<b>0,56</b>	0,14	<b>0,55</b>	0,36
Pt-Bic	-0,05	0,29	0,11	4,0*10 <sup>-4</sup>	0,47	<b>0,66</b>	<b>0,65</b>	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,63</b>
Po-Bic	0,36	0,06	0,39	0,04	0,36	0,14	0,11	0,08	0,15	0,13

Correlaciones significativas en negrita ( $p < 0,05$ ).

### 3.5. Relaciones entre las fracciones de P del suelo y los balances acumulados de P.

La Figura 2.2 muestra las relaciones entre las fracciones de P (0-20 cm de profundidad) que se correlacionaron con el rendimiento de grano y el balance aparente acumulado de P. Estas relaciones fueron significativas ( $p < 0,05$ ) para todas las fracciones de P y los suelos, excepto para el Po-FG. La relación entre el Pt-Bic y el balance aparente acumulado de P mostró diferentes pendientes e interceptos ( $p < 0,05$ ) para cada suelo. La pendiente y el intercepto del Molisol fueron mayores que las del Vertisol. La pendiente de P-Bray1 también tendió a ser mayor en el Molisol que en el Vertisol ( $p = 0,053$ ). En las relaciones del balance aparente acumulado de P con el Pt-FG, los dos suelos no difirieron en su pendiente ( $p = 0,12$ ), pero sí difirieron significativamente en sus interceptos ( $p < 0,05$ ). El valor de pendiente común para el Pt-FG fue de  $0,047 \text{ mg P kg}^{-1}$  suelo por unidad de cambio en el balance aparente acumulado de P.

Cuando se comparó la relación del balance aparente acumulado de P con las fracciones de P del suelo en cada suelo, para el Molisol, el P-Bray1 y el Pt-FG no mostraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) en sus pendientes, con una pendiente común de  $0,041 \text{ mg P kg}^{-1}$  suelo por unidad de cambio en el balance acumulado de P. En cambio, el Pt-Bic difirió en su pendiente de las otras fracciones. La intercepción para el Pt-Bic fue significativamente diferente de la de P-Bray1 y Pt-FG en el Molisol (Figura 2.2). Para el Vertisol, el P-Bray1 y el Pt-Bic no difirieron en su pendiente e interceptos. La pendiente común fue de  $0,0147 \text{ mg P kg}^{-1}$  de suelo por unidad de cambio en el balance acumulado de P, y la intercepción fue de  $7,9 \text{ mg P kg}^{-1}$  del suelo. Sin embargo, el Pt-FG mostró una mayor pendiente e intercepción que el P-Bray1 y el Pt-Bic ( $p < 0,05$ ).



**Figura 2.2.** Relación entre el balance aparente acumulado de P (P aplicado como fertilizante – extracción de P por los cultivos) y: a) P-Bray1 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), b) P total en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), c) P total en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), y d) P orgánico en FG (Po-FG) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) a 0-20 cm de profundidad. Los círculos representan los

puntos del Molisol, y los triángulos los del Vertisol. Referencias: 0 inicial 0 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 0 inicial 36 anual=0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 0 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 36 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual. ns: no significativo.

#### 4. Discusión

##### 4.1. Las fracciones de P del suelo cambian con la fertilización a largo plazo

Después de 1 año de la aplicación inicial de P, aumentaron las fracciones de P inorgánico, pero no aumentaron las fracciones de P orgánico (Cuadro 2.2), probablemente porque los compuestos de materia orgánica medidos en el plazo de un año posterior a la aplicación no fue un destino relevante del P del fertilizante. Por otra parte, si se determinaron principalmente incrementos en las fracciones de P total en relación con un mayor nivel de P inorgánico en las parcelas fertilizadas (Negassa y Leinweber, 2009, Wyngaard et al., 2013). Las fracciones de P orgánico probablemente aumentarían debido a más insumos y reciclaje de P a través de residuos de cultivos en suelos con un balance de P positivo.

La fertilización con P a largo plazo (después de 9 años de fertilización continua) aumentó las fracciones de P total, principalmente debido a los aumentos de las fracciones de P inorgánico, como se informó anteriormente en la literatura (Guggenberger et al., 2000; Bunemann et al., 2006; McLaughlin et al., 2011; Wyngaard et al., 2013), tanto para la fertilización con P inicial como para la anual en el Molisol y el Vertisol. Los incrementos en el P inorgánico con la fertilización fueron hasta 5 y 14 veces mayor que en el P orgánico para los dos suelos, Molisol y Vertisol, respectivamente. Sin embargo, en valor absoluto (mg kg<sup>-1</sup>) dichos incrementos en general fueron mayores en el Molisol que en el Vertisol.

La fertilización anual con P aumentó todas las fracciones de P orgánico en el Molisol, mientras que en el Vertisol el Po-Bic fue la única fracción orgánica que mostró un cambio a 0-5 cm. Esas diferencias entre el Molisol y el Vertisol podrían deberse a la fertilidad nativa del suelo Molisol (valores de P iniciales más altos) (Salas et al., 2003; Ciampitti et al., 2011b). Además, las diferencias probablemente podrían estar relacionadas con una mayor productividad y biomasa de los cultivos en el Molisol en comparación con el Vertisol (Novelli et al., 2017), que produjo una mayor cantidad de P orgánico y reciclaje a partir de residuos de los cultivos. La fertilización inicial no aumentó las fracciones de P orgánico en el Molisol y el Vertisol después de 9 años, debido a que los balances acumulados de P a largo plazo fueron ligeramente negativos en el tratamiento sin aplicación anual de P.

Las fracciones de P del suelo que más aumentaron con la fertilización con P a largo plazo en este estudio coincidieron con los resultados publicados por Ciampitti et al. (2011b). En esta tesis, se observó que la fertilización con P causó un aumento similar o mayor en las fracciones que incluían el P orgánico más inorgánico lábil (es decir, Pt-Bic y Pt-FG), respecto al observado en el P-Bray1 (Figura 2.1). Este resultado estuvo en concordancia con Ciampitti et al. (2011b), quienes informaron que el Pt-FG era una fracción sensible a la fertilización a largo plazo en suelos de textura más gruesa de la región pampeana central de Argentina. Por lo tanto, Pt-FG mostró cambios con la fertilización a largo plazo, ya que es una fracción de P lábil enriquecida por el reciclaje de P del suelo a través de los cultivos (Cambardella y Elliott, 1992; Salas et al., 2003; Ha et al., 2008).

#### 4.2. Nutrición fosfatada de los cultivos

Ni la fertilización inicial ni la anual con P afectaron el crecimiento y el rendimiento del maíz en el Molisol. Estos resultados podrían deberse a que el P-Bray1 del suelo de todos los tratamientos estuvo por encima de la concentración crítica calibrada para el maíz en la Región Pampeana (Sucunza et al., 2018). Esta falta de respuesta del cultivo a la adición de P probablemente también determinó la falta de correlación entre las fracciones de P del suelo y las variables de cultivo de maíz. En contraste, la soja respondió a la fertilización con P (rendimiento de grano, biomasa aérea, concentración de P en grano y  $P_{\text{acum}}$ ), probablemente porque la mayoría de los valores de P-Bray1 en el Vertisol estaban por debajo de la concentración crítica a una profundidad de 0- 20 cm (Appelhans et al., 2016).

En el Vertisol, las variables del cultivo de soja mostraron una mayor correlación con el Pt-Bic que con el P-Bray1. Appelhans et al. (2016) informaron un coeficiente de correlación significativo entre el Pi-Bic y el rendimiento y RR de soja, que aumentó cuando incluyeron el Po y consideraron el Pt-Bic. Estos resultados mostraron que el P orgánico contribuyó a la nutrición fosfatada del cultivo y mejoró la relación con la acumulación de P., posiblemente debido al efecto potenciador de las temperaturas sobre la mineralización del Po. Además, Ciampitti et al. (2011b) mostraron resultados similares, informando que el Pt-FG estaba relacionado con la acumulación de P en maíz hasta la floración, en concordancia con los resultados del presente estudio en soja.

El suelo Molisol y Vertisol difirieron en sus interceptos en la relación entre el balance aparente acumulado de P y el P-Bray1, el Pt-Bic y el Pt-FG, ya que este parámetro depende del valor inicial de P del suelo (Ciampitti et al., 2011a; Dodd y Mallarino, 2005). En el Vertisol, la pendiente de la relación entre el Pt-Bic y el P-Bray1 con el balance aparente acumulado de P, indicó un mayor cambio en el balance aparente de P requerido para aumentar los valores de Pt-Bic y P-Bray1 que en el Molisol. El Vertisol tiene mayor contenido de arcilla y capacidad de adsorción de P (Quintero et al., 2003), por lo que se necesita más P para aumentar el Pt-Bic en comparación con el Molisol. Además, el Vertisol tenía una secuencia histórica de cultivos menos intensa y una menor productividad (Novelli et al., 2017), y por lo tanto una menor extracción de P.

Se observaron resultados contrastantes en la relación entre el Pt-FG y el balance aparente acumulado de P, donde se observó una pendiente común para ambos suelos. Las diferencias entre los suelos desaparecieron cuando se midió el P en la fracción gruesa del suelo ( $> 53 \mu\text{m}$ ), que excluye a la arcilla donde el P podría ser adsorbido. En el Vertisol, el Pt-FG mostró un cambio relativo más alto (2,8 veces con respecto al tratamiento control) en comparación con otras fracciones (2,5 y 2,2 veces con respecto al tratamiento control para el P-Bray1 y el Pt-Bic, respectivamente). Por lo tanto, se obtuvieron cambios similares en el Pt-FG con balances aparentes acumulados de P similares en tratamientos fertilizados en el Molisol y el Vertisol, ya que la FG está compuesta por residuos de plantas que están parcialmente descompuestos y arena (Ha et al., 2008), poco asociados con las arcillas, pero relacionado con los residuos de cultivos y su reciclaje.

El  $P_{\text{acum}}$  se correlacionó de manera similar con el P-Bray1, el Pt-Bic y el Pt-FG, pero la concentración de P extraíble en el suelo no es el único factor que controla la acumulación de P en los cultivos (Barber, 1980; Fixen y Grove, 1990). Además, hay varios factores que influyen en la nutrición fosfatada de los cultivos y su impacto en el rendimiento en grano (Barber, 1980; Beegle, 2005), por lo que una correlación similar entre el P-Bray1, el Pt-Bic y el Pt-FG con el  $P_{\text{acum}}$  no implica una relación similar con el rendimiento en grano.

## 5. Conclusiones

En el corto plazo, la fertilización con P incrementó las fracciones inorgánicas y totales de P, pero no las fracciones de P orgánico lábil, indicando que dichas fracciones no son un destino del fertilizante en el corto plazo.

En el largo plazo, los mayores cambios en las fracciones de P del suelo con la fertilización se observaron en el P-Bray1, el Pt-Bic y el Pt-FG para el Molisol, y en el Vertisol, además, todas estas fracciones se relacionaron con la concentración de P en grano y el  $P_{acum}$ . Se requirió un mayor balance aparente acumulado de P en el Vertisol para aumentar los valores de Pt-Bic y P-Bray1 que en el Molisol, pero se observó una pendiente común en la relación entre el Pt-FG y el balance aparente acumulado de P en ambos suelos. No se recopilaron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis planteada de que las fracciones de P se incrementan con la fertilización fosfatada en el largo plazo cuando los balances aparentes de P son positivos y que cambian menos en un suelo Vertisol que en un suelo Molisol.

Además, se rechazó la hipótesis de que las fracciones de P del suelo se relacionan positivamente con la concentración de P en grano y el rendimiento en grano en el cultivo de maíz. Mientras que si se verificó en forma positiva para el cultivo de soja. En este cultivo, se determinó que las fracciones de P del suelo se relacionaron positivamente con el  $P_{acum}$ , la concentración de P en grano, y el rendimiento en grano.



**Capítulo III**  
**Efecto de la secuencia de cultivo y la**  
**fertilización fosfatada sobre las fracciones**  
**lábilés de P del suelo**

## 1. Introducción

El sistema de siembra directa fue rápidamente adoptado en Argentina debido a serios problemas de erosión y degradación de los suelos que comprometían la sustentabilidad de los sistemas y a su notable practicidad en comparación con las labranzas convencionales (Puricelli, 1985; Diaz Zorita, 1999). Actualmente, entre el 70 y 90% del área sembrada se encuentra bajo el sistema de siembra directa en la mayor parte de Sudamérica (Wingeyer et al., 2015), aunque sin una rotación de cultivos adecuada. En efecto, el 67% del área sembrada es ocupado por el cultivo de soja como monocultivo (Wingeyer et al., 2015).

Una alternativa a estos sistemas es intensificar las secuencias de cultivos para incrementar la diversidad en las secuencias de cultivo simplificadas y, potencialmente, reducir la presión de la agricultura sobre los campos naturales (Doré et al., 2011). La intensidad de las secuencias de cultivo puede ser definida como la duración del período con cultivos en activo crecimiento (verdes) en una secuencia, sobre una base anual (Novelli et al., 2017). Niveles de alta intensificación de secuencias de cultivo aumentan la cantidad y la frecuencia de las entradas de residuos al suelo (Caviglia et al., 2011).

La productividad de los cultivos depende del suministro de P, como uno de los nutrientes más relevantes (Raghothama, 2005). A nivel global, el 30% de las tierras cultivables son deficientes en P, y la mayoría de estas tierras se encuentran en Sudamérica (MacDonald et al., 2011). En consecuencia, la deficiencia de P y el manejo asociado de los fertilizantes fosfatados comprometen la productividad de los cultivos. En Argentina, en particular, los niveles de P-Bray1 están por debajo de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  en una amplia área de la Región Pampeana, y este problema está aumentando en los últimos años debido al bajo nivel de reposición del P extraído en granos (Sainz Rozas et al., 2013).

La principal fuente de P para la producción de cultivos son los fertilizantes, comúnmente aplicados al voleo en sistemas en siembra directa, permitiendo aplicar mayores dosis de fertilizantes fosfatados que en las aplicaciones en la línea de siembra (Dodd y Mallarino, 2005). Este tipo de fertilización al voleo y en altas dosis no sólo modifica la disponibilidad de P, medido como una fracción de P inorgánico, sino que también modifica las fracciones de P orgánico del suelo (Sharpley, 1985; Boschetti et al., 2003; McDowell et al., 2008). En el corto plazo, la fertilización fosfatada podría afectar de manera diferente a las fracciones de P del suelo cuyo ciclado y renovación dependen de la interacción con la fase sólida del suelo o del reciclado a través de los residuos de los cultivos en secuencias contrastantes en el nivel de intensificación.

Además, en los sistemas donde la materia orgánica del suelo ha aumentado debido a las prácticas de manejo agronómico, la mineralización de las fracciones orgánicas de P aumenta (Ziadi et al., 2013). De esta manera, se ha demostrado que la intensificación de las secuencias de cultivo aumentó la cantidad de residuos vegetales en el suelo (Caviglia et al., 2013; Varela et al., 2014) y en el largo plazo podría incrementar el reciclaje de P, especialmente en aquellas secuencias con mayor aporte de P a través de los residuos de los cultivos. En secuencias de cultivo que incorporaron soja, con bajos aportes de residuos, el contenido de C disminuyó y también disminuyó el Pt-FG (Wyngaard et al., 2013).

La productividad de los Molisoles es mayor que la de los Vertisoles (Tasi, 2009, Novelli et al 2017), lo que afecta el aporte de residuos de los cultivos al suelo y en consecuencia el reciclado de MO y nutrientes. Por otro lado, el aporte de P desde fracciones orgánicas lábiles a la disponibilidad de P para los cultivos podría ser menor en suelos Vertisoles que en suelos Molisoles, dado que estos suelos presentan una

mayor capacidad de retención del P (Boschetti et al., 1998). De esta manera, las diferencias de productividad potencial esperable en los cultivos, así como también las diferencias mineralógicas permiten especular sobre la magnitud de los cambios en las fracciones orgánicas de P del suelo inducidos por secuencias de cultivo de diferente intensidad o por la fertilización fosfatada, se espera entonces que los efectos sobre las fracciones orgánicas lábiles sean mayores en los Molisoles respecto a los Vertisoles.

Se hipotetiza que las fracciones orgánicas lábiles de P: i) se incrementan en función de la intensidad de la secuencia de cultivos, ii) son menos afectadas en un suelo Vertisol que en un Molisol por a) la secuencia de cultivos, y b) la fertilización fosfatada. Además, se hipotetiza que las fracciones orgánicas lábiles de P se relacionan positivamente con el  $P_{acum}$ , y el rendimiento en grano acumulado en diferentes secuencias de cultivo.

Los objetivos fueron evaluar en un Molisol y en un Vertisol:

- ✓ el cambio de las fracciones P del suelo con la fertilización con P en el corto plazo en diferentes secuencias de cultivo,
- ✓ la magnitud de los efectos de las secuencias de cultivo y la fertilización fosfatada,
- ✓ la relación de dichas fracciones con el  $P_{acum}$  y el rendimiento en grano acumulado en diferentes secuencias de cultivo.
- ✓

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Sitio experimental

El estudio se llevó a cabo sobre dos experimentos de largo plazo similares establecidos en el año 2008 en dos suelos contrastantes de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná de INTA, Entre Ríos, Argentina (31°50,9' S; 60°32,3' W). Los suelos de los sitios experimentales fueron descritos como un Molisol y un Vertisol. El Molisol es Serie Tezanos Pinto (Argiudol ácuico fino, mixto, térmico), y el Vertisol es Serie Febré (Hapluderte crómico, fino, ligeramente alcalino, térmico) (Soil Survey Staff, 2014). El clima de la región es templado y húmedo.

El ensayo ha sido conducido aplicando dosis anuales de entre 16 y 30 kg de P  $ha^{-1}$  al voleo en el mes de junio, y fertilización adicional a las secuencias con maíz con 36-50 kg de P  $ha^{-1}$  a la siembra del cultivo. Desde el año 2014, se fertilizó todo el ensayo con una dosis única anual de 24 kg de P  $ha^{-1}$  como superfosfato triple de calcio (0-20-0), aplicada al voleo en el mes de junio.

### 2.2. Tratamientos y diseño experimental

En ambos experimentos los tratamientos incluyen tres secuencias: soja-soja (S-S), trigo/soja (T/S) como doble cultivo, y maíz-maíz (M-M). Luego de ocho años de esas secuencias (2016), cada parcela se dividió en dos subparcelas, con y sin fertilización con P (50 kg  $ha^{-1}$  de P, aplicado al voleo por única vez), i.e. con (+P) y sin fertilización con P (-P). Se utilizó un diseño en parcelas divididas dispuestas en bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones. La parcela mayor (30 m de largo x 6 m de ancho) fue asignada a la secuencia y la sub-parcela a la dosis de P (15 m de largo x 6 m de ancho).

La secuencia S-S y M-M tuvieron un índice de intensificación de la secuencia (IS) similar, i.e. IS=0.44, pero diferente cantidad y calidad de los residuos de cultivos, mientras que la secuencia T/S tuvo una IS=0.89 (Novelli et al., 2017).

Se realizó un muestreo de suelo en las tres secuencias de cultivos en otoño de 2016, antes de la subdivisión de las parcelas mayores y la aplicación de P en las

subparcelas fertilizadas. Un año después (otoño de 2017) se realizó un muestreo de suelo en todas las subparcelas (con y sin fertilización con P). En cada muestreo de suelo se colectaron muestras compuestas (15-20 submuestras por parcela) a dos profundidades, 0-5 cm y 5-20 cm.

### 2.3. Muestreo y análisis de suelo

Las muestras de suelo fueron secadas al aire, molidas, y tamizadas a 2 mm. En cada muestra de suelo se determinó P-Bray1 (Bray y Kurtz, 1945), y P total, orgánico, e inorgánico en extractos de  $\text{NaHCO}_3$  y en la fracción gruesa del suelo (Sección 2.3 del Capítulo 2 de esta Tesis). Los valores de P de cada fracción a 0-20 cm de profundidad fueron calculados como el promedio ponderado de los valores obtenidos de las muestras de suelo a 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad.

### 2.4. Mediciones en los cultivos y análisis vegetal

La biomasa de los cultivos de soja de primera, trigo, soja de segunda y el maíz del año 2016/7 y 2017/18 fue medida muestreando un área de 1 m<sup>2</sup> en cada subparcela en madurez fisiológica. El rendimiento en grano de los cultivos de soja, maíz y trigo fueron determinados con una cosechadora experimental sobre 15 m<sup>2</sup> en cada subparcela, y fue corregido por humedad a 145, 135, and 140 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Se calculó el rendimiento acumulado ( $\text{Rend}_{\text{acum}}$ ) para cada secuencia de cultivo sumando los rendimientos de los cultivos involucrados durante los 2 años evaluados. Tanto las muestras de biomasa aérea como de granos fueron secadas a 65 °C, y molidas a 1 mm. El contenido de P en la biomasa aérea y granos fue determinado por colorimetría después de una digestión con  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  (Kuo, 1990).

La extracción de P en los granos ( $\text{P}_{\text{extacum}}$ ) fue calculada como el producto del rendimiento en grano de cada cultivo y la concentración de P en grano de dicho cultivo, acumulando los dos años. La concentración de P en grano en cada tratamiento fue determinada en 2016/17 y 2017/18 para los cultivos de soja de primera, trigo, soja de segunda y maíz. Se determinó el contenido de P en los residuos ( $\text{P}_{\text{res}}$ ) como el producto de la biomasa aérea (sin los granos) y su concentración de P. Se calculó el P acumulado total en la biomasa ( $\text{P}_{\text{acum}}$ ) sumando el  $\text{P}_{\text{res}}$  y el  $\text{P}_{\text{extacum}}$  durante los dos años. Se calculó el índice de cosecha de P (ICP) como el cociente entre el  $\text{P}_{\text{extacum}}$  y el  $\text{P}_{\text{acum}}$ .

### 2.5. Análisis estadísticos

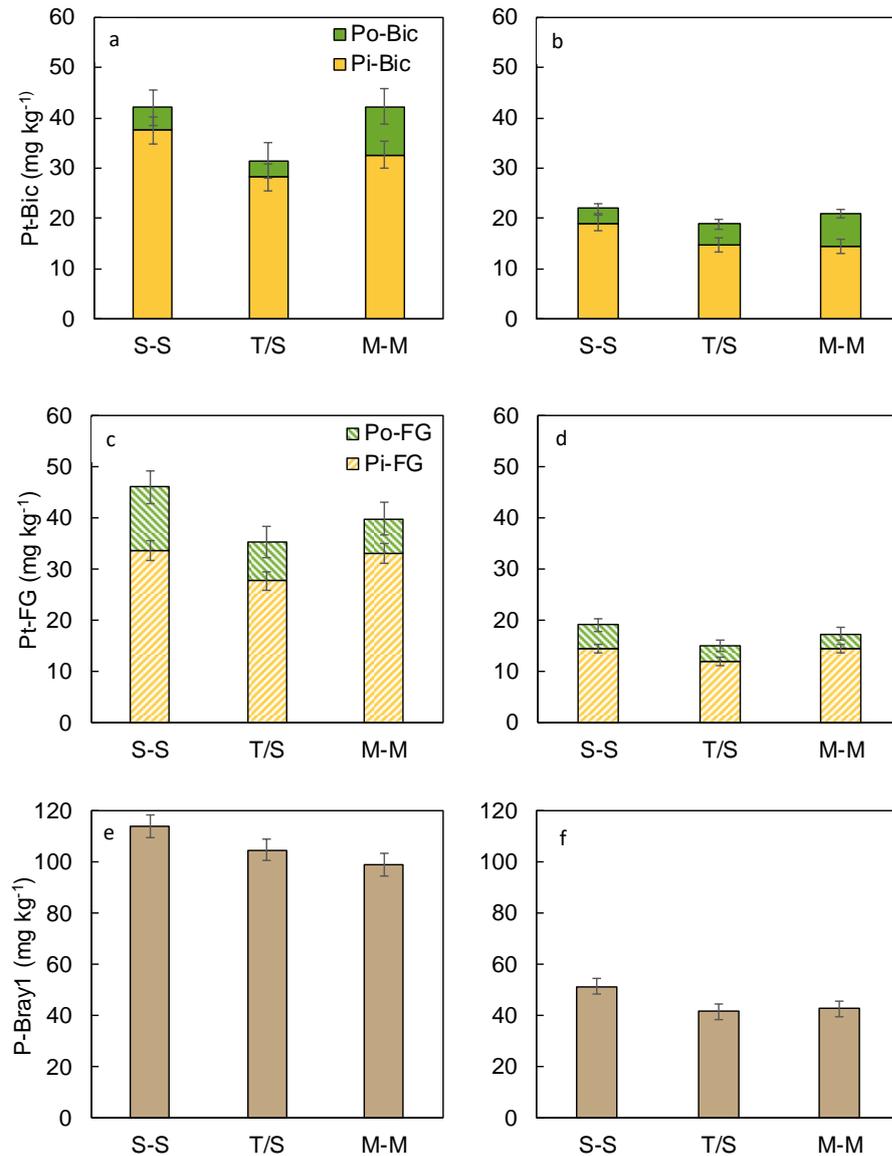
Los datos obtenidos de los cultivos y las fracciones de P del suelo fueron analizados mediante ANOVA, y las medias de los tratamientos fueron comparadas mediante la prueba LSD. Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Se incluyó un análisis multivariado (análisis de componentes principales, ACP) realizado mediante el procedimiento *prcomp* del paquete *factoextra* de R (R Core Team, 2013). Para el ACP se consideraron las variables: P-Bray1, Pi-Bic, Po-Bic, Pi-FG y Po-FG,  $\text{Rend}_{\text{acum}}$  y  $\text{P}_{\text{acum}}$ . Sólo los dos primeros ejes (Eje CP1 y CP2) fueron graficados.

## 3. Resultados

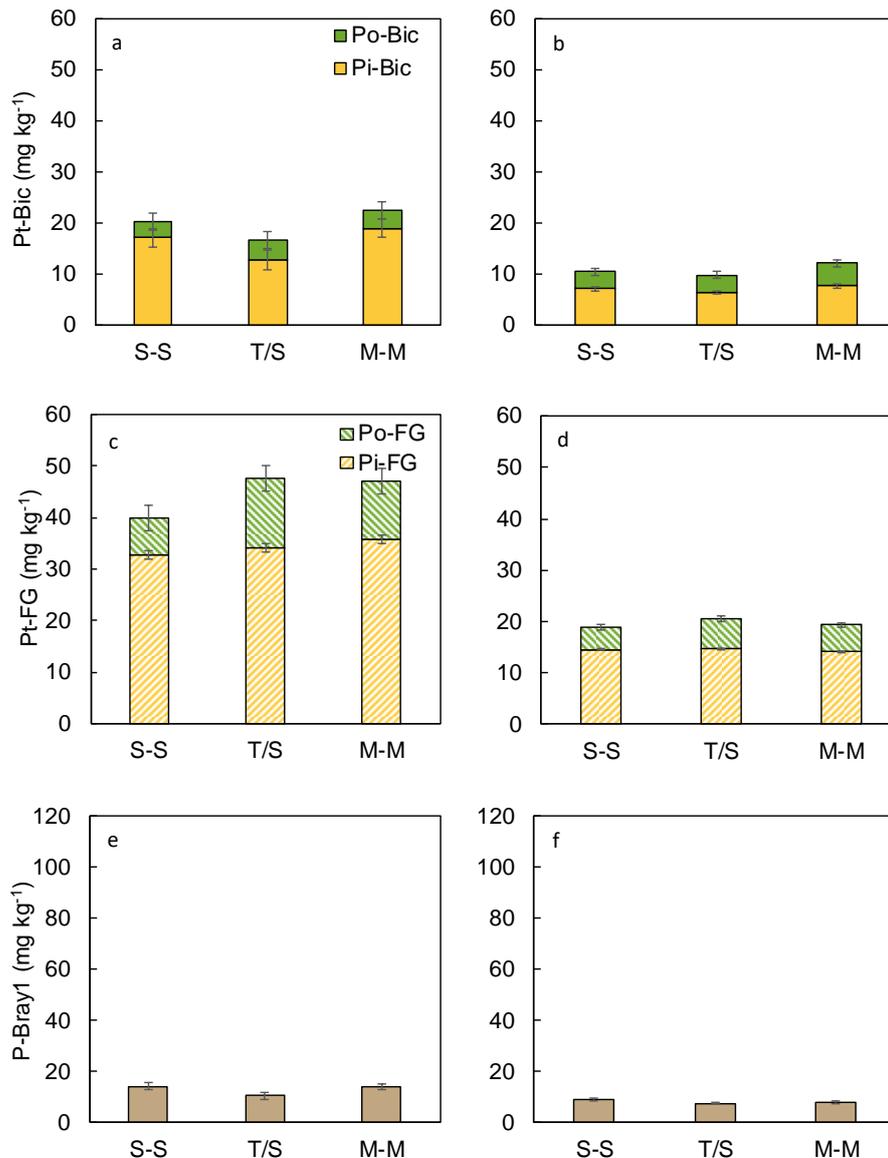
### 3.1. Características iniciales

El contenido de P total de las diferentes fracciones de P, obtenido al sumar el P orgánico e inorgánico, y el P-Bray1 no mostraron diferencias significativas entre las secuencias de cultivo para ambos suelos y profundidades (Figura 3.1 y 3.2). Asimismo, no se observaron efectos significativos de las secuencias de cultivos en ninguna de las fracciones de P. En el Vertisol se midió una menor variabilidad de las fracciones de P en

el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  respecto del Molisol a 0-5 cm de profundidad (Figura 3.2). El P-Bray1 mostró una mayor concentración de P en el Molisol que en el Vertisol para ambas profundidades. En contraste, el P en la fracción gruesa del suelo mostró un rango similar de P en el Molisol y el Vertisol en ambas profundidades.



**Figura 3.1.** Contenido de fósforo de diferentes fracciones en el Molisol, en tres secuencias de cultivo, i.e. monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M): a) P total en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic) a 0-5 cm de profundidad, b) Pt-Bic a 0-20 cm de profundidad, c) Pt en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) a 0-5 cm de profundidad, d) Pt-FG a 0-20 cm de profundidad, e) P-Bray1 a 0-5 cm de profundidad, y f) P-Bray1 a 0-20 cm de profundidad



**Figura 3.2.** Contenido de fósforo de diferentes fracciones en el Vertisol, en tres secuencias de cultivo, i.e. monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como doubles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M): a) P total en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic) a 0-5 cm de profundidad, b) Pt-Bic a 0-20 cm de profundidad, c) Pt en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) a 0-5 cm de profundidad, d) Pt-FG a 0-20 cm de profundidad, e) P-Bray1 a 0-5 cm de profundidad, y f) P-Bray1 a 0-20 cm de profundidad.

### 3.2. Efectos de la fertilización en las diferentes secuencias de cultivos

Luego de un año de la aplicación de P se evaluaron los efectos principales de las secuencias de cultivo y de la fertilización, que se muestran en el Cuadro 3.1. En el suelo Molisol, no se obtuvieron efectos significativos de la fertilización fosfatada en ninguna de las variables analizadas. La secuencia de cultivos incrementó significativamente el  $P_{acum}$  y el  $P_{extacum}$  en las secuencias M-M y T/S respecto a la secuencia S-S, en cambio el ICP fue significativamente mayor en las secuencias S-S y M-M que en la secuencia T/S, por lo que el  $P_{res}$  fue mayor en la secuencia T/S. Las variables no mostraron interacción Secuencia  $\times$  P, excepto para el Rend<sub>acum</sub>. En el caso del Rend<sub>acum</sub>, la secuencia de mayor Rend<sub>acum</sub> fue la de M-M y la de menor fue S-S, sin efectos de la fertilización fosfatada

en ambas secuencias. En la secuencia T/S, con Rend<sub>acum</sub> intermedios, se obtuvieron incrementos significativos en el Rend<sub>acum</sub> cuando se fertilizó con P.

En el suelo Vertisol, no se obtuvieron efectos significativos de la fertilización fosfatada en ninguna de las variables (Cuadro 3.1). Sin embargo, se detectó interacción significativa SecuenciaxP para todas las variables, excepto para el Rend<sub>acum</sub>. El Rend<sub>acum</sub> no mostró efectos significativos de la fertilización fosfatada pero sí de la secuencia de cultivos, siendo mayor en la secuencia M-M, seguida por la secuencia T/S y S-S. El P<sub>acum</sub> y el P<sub>extacum</sub> fueron significativamente mayores en la secuencia M-M, seguido de la secuencia T/S y S/S, sin efecto de la fertilización fosfatada. El mayor ICP lo mostró la secuencia de M-M y como así también la secuencia S-S fertilizada con P. La secuencia T/S fue la de menor ICP, por lo tanto, el P<sub>res</sub> fue mayor en la secuencia T/S. La secuencia de menor P<sub>res</sub> fue S-S.

**Cuadro 3.1.** Análisis de varianza, efectos principales e interacciones entre los tratamientos: monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M) en: P acumulado total ( $P_{acum}$ ) de la secuencia de cultivos en 2 años, rendimientos acumulados en 2 años, P extraído acumulado ( $P_{extacum}$ ), contenido de P en los residuos ( $P_{res}$ ) índice de cosecha de P (ICP).

Suelo	Tratamiento	$P_{acum}$		Rend <sub>acum</sub>		$P_{extacum}$		$P_{res}$		ICP		
		kg ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>				
Molisol	S-S	66	b†	7437		50	b	16	b	0.80	a	
	M-M	107	a	17714		86	a	21	ab	0.83	a	
	T/S	117	a	12245		74	ab	43	a	0.59	b	
	(+P)	100		12789		72		28		0.73		
	(-P)	93		12142		67		26		0.74		
	S-S (+P)	67		7308	<b>d</b>	50		18		0.75		
	S-S(-P)	65		7566	<b>d</b>	50		15		0.84		
	M-M(+P)	111		17562	<b>a</b>	90		21		0.84		
	M-M(-P)	103		17865	<b>a</b>	83		20		0.82		
	T/S(+P)	122		13497	<b>b</b>	78		44		0.61		
	T/S(-P)	111		10994	<b>c</b>	69		42		0.57		
	ANOVA											
	Secuencia		p<0,05		p<0,01		p<0,05		p<0,05		p<0,01	
	P		ns		ns		ns		ns		ns	
Secuencia x P		ns		p<0,001		ns		ns		ns		
Vertisol	S-S	41		5720	c	34		7		0.85		
	M-M	93		15423	a	83		10		0.90		
	T/S	62		9316	b	49		13		0.76		
	(+P)	66		10246	a	56		11		0.84		
	(-P)	65		10059	a	55		9		0.82		
	S-S (+P)	41	<b>c</b>	6007		36	<b>c</b>	6.1	<b>b</b>	0.91	<b>a</b>	
	S-S(-P)	42	<b>c</b>	5432		33	<b>c</b>	8.1	<b>b</b>	0.79	<b>bc</b>	
	M-M(+P)	88	<b>a</b>	15036		77	<b>a</b>	10.8	<b>ab</b>	0.87	<b>ab</b>	
	M-M(-P)	98	<b>a</b>	15810		88	<b>a</b>	9.3	<b>b</b>	0.92	<b>a</b>	
	T/S(+P)	68	<b>b</b>	9696		53	<b>b</b>	15.2	<b>a</b>	0.74	<b>c</b>	
	T/S(-P)	56	<b>bc</b>	8936		45	<b>bc</b>	11.0	<b>ab</b>	0.76	<b>c</b>	
	ANOVA											
	Secuencia		p<0,01		p<0,001		p<0,001		ns		p<0,05	
	P		ns		ns		ns		ns		ns	
Secuencia x P		p<0,05		ns		p<0,05		p<0,05		p<0,001		

† Letras diferentes indican efecto principal significativo para la secuencia de cultivo o la fertilización con P ( $p<0,05$ ). Letras en negrita se refieren a diferencias significativas para las variables que mostraron interacción de la Secuencia x P. ns= no significativo.

En cuanto a las fracciones de P del suelo, no se observó interacción Secuencia × P para ningún suelo a 0-5 cm de profundidad (Cuadro 3.2). En el suelo Molisol, se obtuvieron incrementos significativos con la fertilización fosfatada en todas las fracciones extraídas con  $\text{NaHCO}_3$ , y en el Pi-FG. La secuencia de cultivos no afectó

significativamente a las fracciones Po-Bic, Pt-FG y Po-FG. En las demás fracciones de P medidas, la secuencia S-S mostró un mayor contenido de P que las demás secuencias. En el suelo Vertisol, la fertilización fosfatada aumentó significativamente las fracciones Pi-Bic, Pt-Bic y P-Bray1. En cuanto al efecto de la secuencia de cultivos, no se detectaron efectos significativos sobre ninguna de las fracciones de P medidas, excepto en el P-Bray1 que fue mayor en la secuencia S-S, y menor en la secuencia T/S.

A 0-20 cm de profundidad, tampoco se observó interacción Secuencia  $\times$  P para ningún suelo (Cuadro 3.3). En el Molisol, se obtuvieron incrementos significativos con la fertilización fosfatada en todas las fracciones extraídas con  $\text{NaHCO}_3$ , y en el Pi-FG. La secuencia de cultivos S-S fue la que mostró un contenido significativamente mayor de las fracciones Pi-Bic y Pt-Bic. El contenido de P-Bray1 fue significativamente mayor en la secuencia S-S, siendo la secuencia T/S la de menor contenido de P-Bray1. Las demás fracciones de P no se modificaron por efecto de la secuencia de cultivos.

**Cuadro 3.2.** Análisis de varianza, y efectos principales los tratamientos: monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M), fertilizados (+P) y no fertilizados(-P) en los suelos Molisol y Vertisol a 0-5 cm de profundidad: P-Bray1, P total (Pt-Bic), inorgánico (Pi-Bic), y orgánico (Po-Bic) en extracto de NaHCO<sub>3</sub>, P total (Pt-FG), inorgánico (Pi-FG), y orgánico (Po-FG) en la fracción gruesa del suelo.

Suelo	TRATAMIENTO	P-Bray1	Pt-Bic	Pi-Bic	Po-Bic	Pt-FG	Pi-FG	Po-FG
Molisol	S-S	101 a†	57 a	50 a	7,1	65	45 a	20
	M-M	65 ab	37 b	32 b	5,3	59	35 ab	24
	T/S	52 b	41 ab	34 b	7,0	57	30 b	28
	(+)P	73	53 a	44 a	8,9 a	64	41 a	23
	(-)P	72	37 b	34 b	3,9 b	57	31 b	25
Vertisol	S-S	50 a	26	23	2,9	31	18	13
	M-M	44 ab	25	20	4,5	29	18	11
	T/S	31 b	20	17	2,9	43	22	21
	(+)P	50 a	28 a	24 a	3,8	36	19	17
	(-)P	34 b	20 b	16 b	3,1	32	19	13

† Letras diferentes indican efecto principal significativo para la secuencia de cultivo o la fertilización con P ( $p < 0,05$ ).

**Cuadro 3.3.** Análisis de varianza, y efectos principales los tratamientos: monocultivo de soja (S-S), Trigo/Soja como dobles cultivos (T/S), y monocultivo de maíz (M-M), fertilizados (+P) y no fertilizados(-P) en el suelo Molisol y Vertisol a 0-20 cm de profundidad: P-Bray1, P total (Pt-Bic), inorgánico (Pi-Bic), y orgánico (Po-Bic) en extracto de NaHCO<sub>3</sub>, P total (Pt-FG), inorgánico (Pi-FG), y orgánico (Po-FG) en la fracción gruesa del suelo.

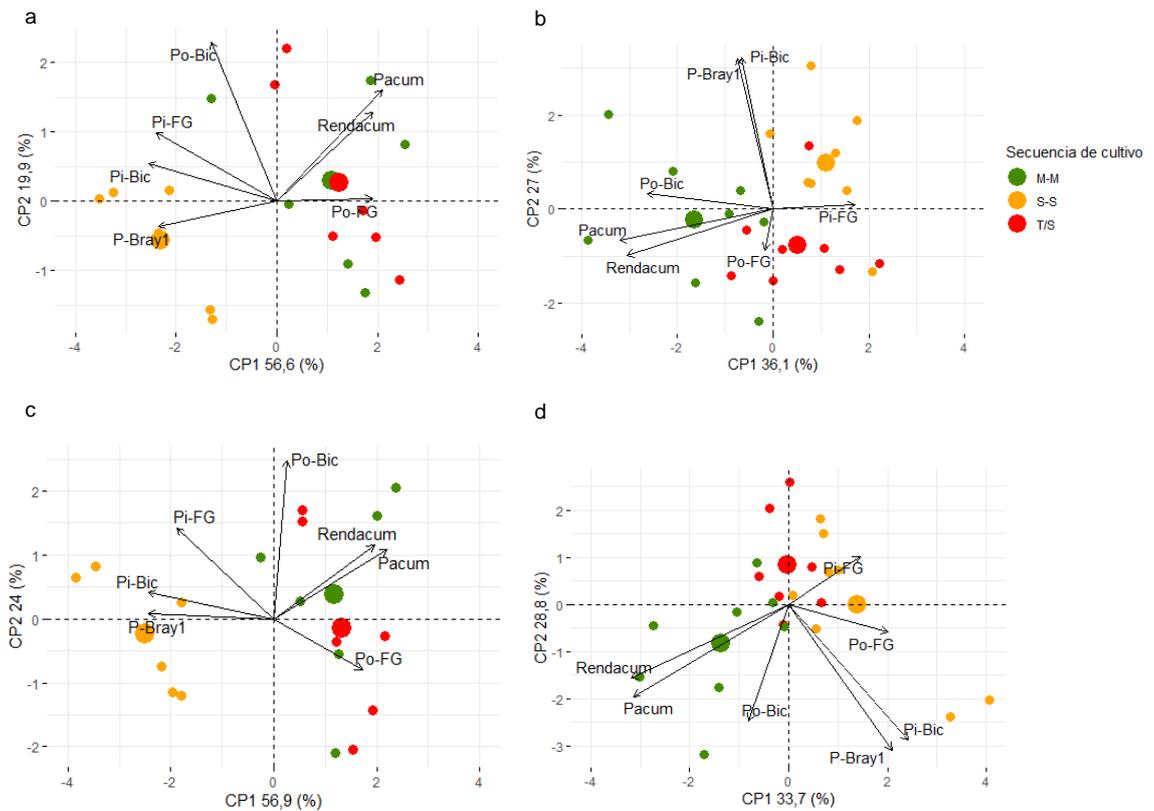
Suelo	TRATAMIENTO	P-Bray1	Pi-Bic	Pt-Bic	Po-Bic	Pt-FG	Pi-FG	Po-FG
Molisol	S-S	52 a†	23 a	28 a	4,8	28	20	8
	M-M	33 ab	16 b	21 b	5,3	27	17	10
	T/S	28 b	15 b	21 b	5,2	26	16	11
	(+)P	37	19 a	25 a	5,7 a	28	19 a	9
	(-)P	38	17 b	21 b	4,5 b	26	16 b	10
Vertisol	S-S	19	11	14	2,8	19	9	10
	M-M	17	9	12	2,9	17	9	8
	T/S	12	8	10	2,0	21	9	11
	(+)P	18 a	10 a	13 a	2,8 a	19	9	10
	(-)P	14 b	8 b	11 b	2,3 b	19	10	9

† Letras diferentes indican efecto principal significativo para la secuencia de cultivo o la fertilización con P ( $p < 0,05$ ).

En el Vertisol, la fertilización fosfatada aumentó significativamente todas las fracciones de P extraídas con  $\text{NaHCO}_3$  y el P-Bray1. Si bien hubo incrementos significativos en el Po-Bic con la fertilización fosfatada, la magnitud de dicho cambio fue menor a  $1 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Las secuencias de cultivo no modificaron significativamente ninguna de las fracciones de P medidas.

En el análisis de ACP en el Molisol, los dos primeros ejes del ACP explicaron el 76,4 y 80,9% de la variabilidad total a 0-5 y 0-20 cm de profundidad (Figura 3.3a y c). Para el CP1, en ambas profundidades las fracciones inorgánicas de P se asociaron estrechamente y no se relacionaron con el Po-Bic en ninguna profundidad evaluada. Asimismo, dichas fracciones se asociaron a la secuencia S-S. El  $\text{Rend}_{\text{acum}}$  y  $\text{P}_{\text{acum}}$  se relacionaron estrechamente y con el Po-FG especialmente a 0-5 cm de profundidad, y se asociaron a aquellas secuencias que incorporaron gramíneas. Dichas variables se relacionaron negativamente con las fracciones inorgánicas de P. Por lo tanto, el CP1 permitió discriminar la secuencia S-S, de las secuencias T/S y M-M. En el CP2 todas las variables se asociaron positivamente, excepto el P-Bray1 a 0-5 cm y el Po-FG a 0-20 cm de profundidad.

En el Vertisol, los dos primeros ejes del ACP explicaron similares porcentajes de la variabilidad total, siendo 62,6 y 63,1% a 0-5 y 0-20 cm de profundidad, respectivamente (Figura 3.3b y d). Para el CP1, el P-Bray y el Pi-Bic se asociaron estrechamente entre sí, con los mayores pesos positivos a 0-5 cm y los mayores pesos negativos a 0-20 cm de profundidad, sin asociación con el Pi-FG. El  $\text{Rend}_{\text{acum}}$  y  $\text{P}_{\text{acum}}$  se relacionaron estrechamente y tuvieron los mayores pesos negativos en el CP1, estando más asociados con el Po-Bic que con las fracciones inorgánicas de P. Además, el Po-Bic se asoció con la secuencia M-M, y el Pi-FG con la secuencia S-S en ambas profundidades. En el CP2, el P-Bray1 fue la variable de mayor peso positivo a 0-5 cm y negativo a 0-20 cm de profundidad. El ACP no permitió discriminar claramente entre las diferentes secuencias de cultivo en este suelo.



**Figura 3.3.** Análisis de componentes principales (ACP). Las diferentes secuencias de cultivo se graficaron en función de las fracciones de P del suelo, las características del suelo y el rendimiento acumulado ( $Rend_{acum}$ ) y P acumulado total ( $P_{acum}$ ) de las secuencias de cultivo (vectores) en: a) Molisol a 0-5 cm de profundidad, b) Vertisol a 0-5 cm de profundidad, c) Molisol a 0-20 cm de profundidad, y d) Vertisol a 0-20 cm de profundidad. Círculos grandes representan los promedios para cada secuencia de cultivo, círculos pequeños representan los valores individuales de cada secuencia de cultivo.

Los vectores de línea corresponden a  $Rend_{acum}$  y  $P_{acum}$  de las secuencias de cultivo, P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en la FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de  $NaHCO_3$  (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de  $NaHCO_3$  (Po-Bic).

**Cuadro 3.4.** Autovalores de los autovectores e1 y e2 resultantes del análisis de componentes principales (ACP) para el rendimiento acumulado ( $Rend_{acum}$ ) y P acumulado total ( $P_{acum}$ ) de las secuencias de cultivo, P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de  $NaHCO_3$  (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de  $NaHCO_3$  (Po-Bic) en los suelos Molisol y Vertisol, a 0-5 cm y 0-20 cm de profundidad.

Variables	Molisol				Vertisol			
	0-5 cm		0-20 cm		0-5 cm		0-20 cm	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
Pi-Bic	-0,46	0,17	-0,47	0,12	-0,12	0,67	0,40	-0,51
Po-Bic	-0,23	0,69	0,05	0,73	-0,48	0,07	-0,13	-0,44
P-Bray1	-0,42	-0,11	-0,47	0,03	-0,13	0,67	0,34	-0,55
Pi-FG	-0,43	0,30	-0,36	0,42	0,31	0,02	0,24	0,18
Po-FG	0,34	0,01	0,33	-0,24	-0,03	-0,18	0,33	-0,1
$P_{acum}$	0,38	0,49	0,42	0,32	-0,58	-0,14	-0,52	-0,35
$Rend_{acum}$	0,34	0,39	0,38	0,34	-0,55	-0,21	-0,52	-0,28

## 4. Discusión

### 4.1 Características iniciales de los experimentos

En la situación inicial, luego de 8 años de secuencias de cultivo S-S, M-M y T/S no se obtuvieron efectos significativos en las diferentes fracciones de P medidas en ambos suelos. En particular, en la FG se obtuvieron valores similares en las concentraciones de P en el suelo Molisol y Vertisol, como ha sido reportado en el Capítulo II de esta Tesis, si bien el aporte de residuos por los cultivos es menor en el suelo Vertisol (Novelli et al., 2017). Además, posiblemente debido a su composición (residuos de los cultivos parcialmente descompuestos, Ha et al., 2008), las concentraciones de P en la FG del suelo parecen ser menos dependientes del tipo de suelo que las demás fracciones lábiles de P obtenidas con extractantes químicos. Es decir, que dichas fracciones de P podrían ser de utilidad como índice de diagnóstico de disponibilidad de P independientemente del tipo de suelo, ya que en general, se ha demostrado que los niveles críticos de P utilizados en la actualidad en base al P-Bray1 dependen del tipo de suelo (Correndo, 2018).

En el largo plazo, y con secuencias de cultivos estabilizadas, se esperaba que las diferentes secuencias de cultivos presenten diferencias en el P de la FG debido a las diversas calidades y cantidades de residuos de los cultivos aportados a lo largo de los años. En la secuencia S-S, el alto P en FG estuvo más asociado al  $P_i$  que al  $P_o$ . De esta manera, la secuencia S-S presentó contenidos similares de P que las secuencias con residuos de gramíneas, i.e. T/S y M-M, de mayores relaciones C/N/P cuya descomposición es más lenta (Buchanan y King, 1993).

### 4.2 Efectos de la fertilización en las diferentes secuencias de cultivos

#### 4.2.1. Nutrición de cultivo

Luego de un año de la fertilización con P, en el Molisol no se hallaron efectos en el  $Rend_{acum}$ , probablemente debido a que los niveles iniciales de P-Bray1 del suelo (Figura 3.1) estaban por encima de los niveles críticos calibrados para dichos cultivos (Sucunza et al., 2018). En la secuencia T/S, solo para el cultivo de trigo se observó respuesta a la fertilización fosfatada (datos no mostrados), y un incremento significativo del  $Rend_{acum}$ . Esto probablemente se asocia a que el cultivo de trigo posee niveles críticos más elevados que los demás cultivos incluidos en esta secuencia (Mallarino et al., 2013; Sucunza et al., 2018). El  $Rend_{acum}$  de la secuencia M-M se debe a la mayor productividad del cultivo de maíz en comparación con los demás cultivos (Novelli et al., 2017). Las secuencias M-M y T/S mostraron los mayores valores de  $P_{acum}$ , pero la secuencia T/S mostró un menor ICP, y por lo tanto un mayor  $P_{res}$ .

En el Vertisol, el  $Rend_{acum}$  y el  $P_{extacum}$  no mostraron efectos significativos de la fertilización fosfatada pero sí de la secuencia de cultivos,  $M-M > T/S > S-S$  debido a las productividades de los cultivos involucrados en cada una de las secuencias. Posiblemente, las propiedades físicas del Vertisol pueden haber magnificado los efectos de períodos de menor precipitación durante el período crítico de los cultivos en comparación con el Molisol. Por lo tanto, en el Vertisol puede haber disminuido más la respuesta de los cultivos a la fertilización (y sus variables asociadas, como  $Rend_{acum}$  y  $P_{acum}$ ).

#### 4.2.2 Fracciones lábiles de P en suelo

En el Molisol, en ambas profundidades, la fertilización incrementó a todas las fracciones de P extractables (Cuadro 3.3) y sólo a la fracción inorgánica en FG, en concordancia con los resultados del Capítulo 2 Sección 2.4.1 donde se analizó el efecto de la fertilización fosfatada luego de un año de aplicación de P. Este incremento en el

Pi-FG podría sugerir que en dicha fracción se encontraban partículas de fertilizante o fosfatos re precipitados, y por lo tanto P no disponible para el cultivo (Suñer y Galantini, 2013). Asimismo, en el largo plazo la fertilización fosfatada también aumentó principalmente las fracciones inorgánicas de P (Zhang y MacKenzie 1997; Capítulo 2 de esta Tesis). Las secuencias de cultivo no incrementaron las fracciones orgánicas de P diferencialmente, probablemente debido a que se requieran manejos más contrastantes de P, como el realizado en el experimento de largo plazo del Capítulo 2 de esta Tesis, con un amplio rango de variación en el balance aparente de P. En este capítulo al igual que en el capítulo 2, no se hallaron efectos de la fertilización diferentes en las fracciones de P medidas a una profundidad de 0-5 cm o 0-20 cm de profundidad.

En general, las fracciones de P (especialmente las inorgánicas) fueron mayores en la secuencia S-S, probablemente debido a la menor extracción de P por el cultivo mediado por los menores Rend<sub>acum</sub> en comparación a las demás secuencias (Figura 3.3 a y c). En cambio, Wyngaard et al. (2013) en trabajos previos encontraron que las secuencias de cultivo que eliminaron las pasturas e incorporaron soja, con bajos aportes de residuos, el contenido de MO disminuyó y también disminuyó el Pt-FG. Sin embargo, cuando los niveles de MO son elevados como en el suelo Molisol, y existe un alto aporte de residuos, es probable que no haya una disminución en el Pt-FG. Las secuencias de cultivo con gramíneas en su composición presentaron las mayores productividades debido a su nivel de intensificación (T/S) o a sus elevados rendimientos (M-M) (Caviglia y Andrade, 2010; Caviglia et al., 2013) y en el suelo Molisol se asociaron al Po-FG (Figura 3.3a y d), probablemente debido a la mayor cantidad de residuos aportados en comparación a la secuencia S-S.

En el Vertisol no se observaron efectos de la secuencia de cultivos en ninguna fracción de P ni profundidad muestreada, excepto en el caso el P-Bray1 cuyo mayor contenido en la secuencia S-S podría deberse a una menor extracción de P por parte de los cultivos. En general, la fertilización fosfatada no afectó ninguna fracción de P en la FG del suelo a ninguna profundidad, posiblemente debido a un bajo aporte de los residuos de cultivos limitados por la menor productividad del suelo (Tasi, 2009; Novelli et al., 2017). El impacto la fertilización fosfatada se pudo observar principalmente en las fracciones inorgánicas de P, al igual que en el Molisol. Los elevados contenidos de arcilla en los Vertisoles determinan una mayor capacidad de adsorción de P (Boschetti et al., 1998; Quinteros et al., 2003), por lo que la magnitud de los cambios en las fracciones de P a igual dosis de fertilizante fosfatado fue menor que en el Molisol.

En el Molisol el impacto de las secuencias de cultivo puede haberse magnificado respecto al Vertisol debido al mayor volumen de residuos, y mayor extracción de P por los cultivos (Figura 3.3). Ha sido reportado previamente que en suelos Vertisoles cuando los aportes de residuos son bajos, disminuye su impacto sobre los niveles de C del suelo (Novelli et al., 2017), y puesto que la dinámica de las fracciones orgánicas de P está estrechamente ligada a la del C (Wyngaard et al., 2016), es probable que se requieran niveles más elevados de aportes de C para producir cambios significativos en las fracciones orgánicas de P del suelo. Además, en dichos suelos, las arcillas esmectíticas pueden proteger la MO de la mineralización (Fabrizzi et al., 2009) y, por lo tanto, podrían reducir el impacto de la intensificación de las secuencias de cultivo en las fracciones orgánicas de P.

## 5. Conclusiones

En el corto plazo, en general, las secuencias de cultivos S-S, M-M y T/S y la fertilización fosfatada no afectaron las fracciones de P en la fracción gruesa del suelo en ninguno de los suelos evaluados, indicando que dichas fracciones no son un destino del fertilizante en el corto plazo. Las concentraciones de P en la FG del suelo resultaron similares en ambos suelos y debido a su composición, parecen ser menos dependientes del tipo de suelo que las demás fracciones lábiles de P obtenidas con extractantes químicos.

Se recopilaron evidencias para rechazar la hipótesis que las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo se incrementan en función de la intensidad de la secuencia de cultivos en el suelo, puesto que estas se asociaron más con la productividad de las secuencias. Así, las secuencias T/S y M-M, de mayor productividad ( $Rend_{acum}$ ) se asociaron con el Po-FG. En el Vertisol, el  $Rend_{acum}$  y  $P_{acum}$  se asociaron con la secuencia M-M y el Po-Bic. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis de que las fracciones orgánicas lábiles de P se relacionan positivamente con el  $P_{acum}$ , y el rendimiento en grano acumulado en diferentes secuencias de cultivo.

La fertilización fosfatada en el corto plazo incrementó principalmente las fracciones inorgánicas extractables de P en ambos suelos, indicando que estas fueron más sensibles a la fertilización fosfatada que a las diferencias en secuencias de cultivo.

El impacto de la secuencia de cultivo y de la fertilización fosfatada en las fracciones de P del suelo resultó mayor en el suelo Molisol ya que su productividad y reciclaje de P son mayores que en el suelo Vertisol, lo que permite no rechazar la hipótesis planteada.

## **Capítulo IV**

**¿Están las fracciones orgánicas lábiles de P  
relacionadas a la falta de respuesta de la soja  
y el maíz a la fertilización fosfatada?**

## 1. Introducción

La mayoría de las recomendaciones de fertilización con P se basan en modelos desarrollados a partir de la estimación del P disponible para los cultivos a través de una fracción de P medida en un extractante químico (Beegle, 2005). En general, dichas fracciones sólo tienen en cuenta el P inorgánico (Pi), a pesar de que en muchos suelos el contenido de P orgánico (Po) excede al de Pi (Steffens et al., 2010; Recena et al., 2016, 2019). Así, la inclusión del Po en los modelos de recomendación de fertilización podría mejorar la precisión de la estimación de P disponible para los cultivos y la capacidad de predicción de la respuesta de los cultivos a la fertilización con P (Salas et al., 2003). En este sentido, Mallarino (2003) y Heckman et al. (2006) mostraron una mejora en la predicción de la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con P cuando midieron una fracción de Po mediante el método de ICP en extractos de NaHCO<sub>3</sub>.

En trabajos previos, algunos estimadores de P disponible que incluyeron fracciones orgánicas lábiles de P, como el P extraído por el NaHCO<sub>3</sub> (Tiessen y Moir, 1993; McDowell et al., 2008), y el P total en la fracción gruesa del suelo (Pt-FG) han sido evaluados satisfactoriamente para mejorar los modelos de recomendación de fertilizantes fosfatados en soja (Appelhans et al., 2016), sugiriendo que podrían ser útiles para maíz. El P total extraído por el NaHCO<sub>3</sub> ha sido evaluado como estimador del P disponible y mostró un mayor ajuste en su relación con el P acumulado en trigo y girasol comparado con el uso de la fracción inorgánica de P (Recena et al., 2019). Además, se sugirieron como estimadores del aporte del P orgánico al P disponible para los cultivos otras fuentes de P orgánico, como el de la fracción gruesa del suelo (Po-FG) y asociado a la mineralización de P orgánico (Wyngaard et al., 2016). Por otro lado, el Pt-FG se relacionó al P acumulado en maíz y fue propuesto como un predictor del estado nutricional fosfatado de los cultivos (Ciampitti et al., 2011), y en este sentido, resultados promisorios fueron obtenidos en un estudio de largo plazo de fertilización fosfatada donde el Pt-FG y el Po-FG mostraron una fuerte relación con el rendimiento del cultivo de soja (Capítulo II de esta Tesis).

El procedimiento de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1971) es utilizado como una herramienta para determinar el nivel crítico de un estimador de la disponibilidad de P para los cultivos mediante la división del rendimiento relativo y el P disponible en dos clases cada uno. Como resultado, quedan determinados 4 cuadrantes, que pueden ser numerados en sentido de las agujas del reloj comenzando desde el cuadrante inferior-izquierdo (Dahnke y Olson, 1990). El nivel crítico de P es el valor que divide los sitios de acuerdo con la probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada. El rendimiento relativo se divide en bajo o alto de acuerdo con un nivel determinado que indica la pérdida de rendimiento aceptable. El valor del nivel crítico de P predice la deficiencia o suficiencia de un nutriente cuando la mayoría de los sitios muestran un bajo rendimiento relativo cuando el valor de P disponible está por debajo del nivel crítico de P (cuadrante 1) y un alto rendimiento relativo cuando el valor de P disponible está por encima del nivel crítico de P (cuadrante 3). Los sitios en los cuadrantes 2 y 4 pueden ser considerados como errores de clasificación ( $Error_{clas}$ ), lo que permite calcular la precisión de un método (Cate y Nelson, 1965; Heckman et al., 2006).

En la región pampeana, las relaciones entre el nivel de P-Bray1 en el suelo y el rendimiento relativo del cultivo de maíz y soja generalmente muestran ajustes relativamente bajos, ( $r^2=0,18$  -  $r^2=0,35$ ) (Melchiori et al., 2008; Gutierrez Boem et al., 2010; Barbagelata, 2011; Appelhans et al., 2016). En los trabajos analizados muchos sitios presentaron altos rendimientos relativos (baja respuesta a la fertilización fosfatada) cuando el nivel de P-Bray1 en el suelo se encontraba por debajo del nivel crítico calibrado para la zona, i.e. error de clasificación (Mallarino, 2003; Heckman et

al., 2006; Melchiori et al., 2008; Gutierrez Boem et al., 2010; Barbagelata, 2011; Appelhans et al., 2016). Específicamente para maíz, Heckman et al. (2006) determinaron que entre el 25 y 50% de los sitios evaluados fueron erróneamente clasificados, i.e. mostraron poca a nula respuesta a la fertilización estando por debajo del nivel crítico de P en el suelo. En dichos sitios donde el P-Bray1 no predice adecuadamente la probabilidad de respuesta (i.e. indicando la necesidad de fertilización con P cuando puede no ser necesaria, Heckman et al. (2006)) se estima que existe alguna fuente adicional de P que aporta al P disponible para los cultivos, y que no es cuantificada por dicha metodología. Por tal motivo, resulta relevante el estudio y la evaluación de métodos complementarios que contemplen fracciones orgánicas que aporten al P disponible para los cultivos, que puedan ser utilizados en los diagnósticos de fertilidad fosfatada en sistemas en siembra directa (Sharpley, 1985; Steffens et al., 2010; Ciampitti et al., 2011b; Wyngaard et al., 2013), donde el P se encuentra en mayor concentración en los primeros centímetros del suelo debido a la descomposición y reciclaje de los residuos de cultivos en la superficie del suelo (Selles et al., 1995).

Además, se ha reportado que los cultivos de maíz y soja son capaces de utilizar fuentes orgánicas de P del suelo que no son determinadas por las metodologías de diagnóstico actuales (Steffens et al., 2010; Belinque et al., 2015). La posibilidad de establecer con precisión la probabilidad de respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada permitiría optimizar el uso de fertilizantes (Fixen y Grove, 1990) y reducir la probabilidad de excesos de fertilizantes en suelos agrícolas con importantes beneficios en el contexto ambiental y productivo (McLaren et al., 2014).

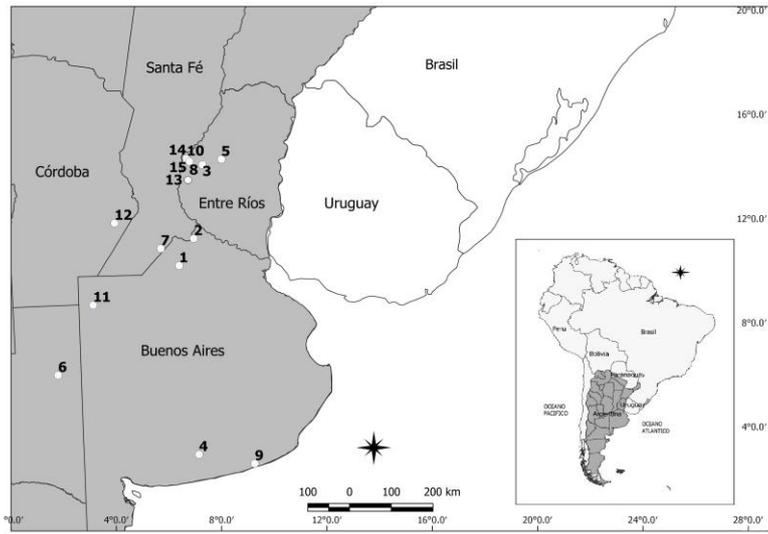
Por lo tanto, se hipotetiza la incorporación de fracciones orgánicas lábiles de P al método de diagnóstico tradicional basado en la determinación de P-Bray1, mejora la capacidad predictiva de la respuesta de los cultivos de maíz y soja a la fertilización.

El objetivo de este capítulo fue determinar si la incorporación de fracciones orgánicas lábiles de P al método de diagnóstico tradicional basado en la determinación de P-Bray1, mejora la capacidad predictiva de la respuesta de los cultivos de maíz y soja a la fertilización.

## **2. Materiales y métodos:**

### *2.1. Características de los sitios con cultivos de maíz:*

Este estudio fue llevado a cabo utilizando muestras de suelo y resultados de una amplia red de experimentos de fertilización fosfatada (79 sitios-año) con cultivos de maíz en la región pampeana argentina realizada durante las campañas 2006/07, 2007/08 y 2008/9. El clima de región es templado húmedo. Todos los sitios fueron sembrados bajo siembra directa y sin riego adicional. Los suelos de los experimentos fueron Hapludoles, Haplustoles, Argiudoles y Hapludertes (Cuadro 4.1). Los tratamientos incluyeron 4 dosis de P: 0 (control), 12, 24 y 36 kg P ha<sup>-1</sup>, en un diseño en bloques completamente aleatorizados con 3 repeticiones. Los fertilizantes fueron aplicados al voleo a mano antes de la siembra del maíz como superfosfato triple.

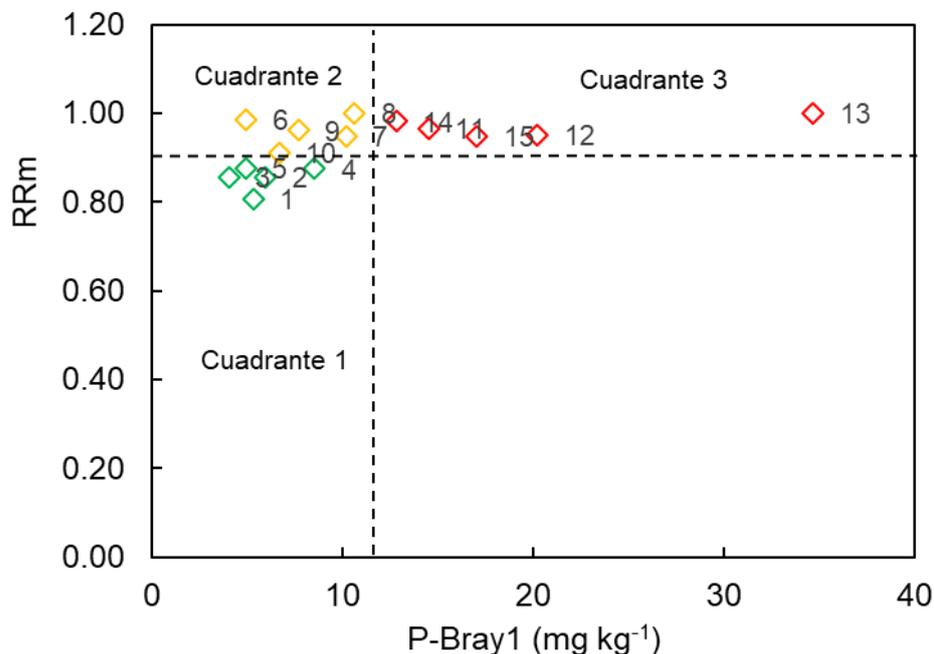


**Figura 4.1.** Localización geográfica de los sitios seleccionados de la red de experimentos de fertilización fosfatada en la región pampeana argentina durante las campañas 2006/07, 2007/08 y 2008/09.

**Cuadro 4.1.** Características de los sitios, localización y años de los experimentos, subgrupo taxonómico de suelo, propiedades de suelo (0-20 cm): materia orgánica del suelo (MO) y textura (arena, limo y arcilla), pH, P-Bray1, y rendimientos de maíz (Rend) de los tratamientos control.

Cuadrante	Sitio	Localización	Año	Subgrupo de suelo	MO .....g kg <sup>-1</sup> .....	Arena	Limo	Arcillas	pH	P-Bray1 mg kg <sup>-1</sup>	Rend kg ha <sup>-1</sup>
1	1	Pergamino 2	2006/07	Argiudol típico	30,5	273	498	229	6,4	5,3	9218
	2	Pergamino 3	2006/07	Argiudol típico	40,0	98	731	171	6,2	5,9	9946
	3	Segui	2007/08	Hapluderte árgico-crómico	53,6	23	330	647	6,5	4,0	6940
	4	Barrow	2007/08	Argiudol típico	44,8	334	415	251	6,1	8,5	4239
	5	Las Tunas	2006/07	Hapluderte árgico	55,0	41	609	350	7,8	4,9	9731
2	6	Anguil	2007/08	Haplustol éntico	24,1	359	383	258	7,8	4,9	5276
	7	Pergamino 1	2006/07	Argiudol típico	41,0	248	536	216	6,3	10,2	11885
	8	Villa Fontana	2007/08	Argiudol vértico	48,9	35	611	354	6,3	10,6	9055
	9	Necochea	2007/08	Argiudol típico	64,3	508	289	203	6,2	7,7	12292
	10	Parana 2	2006/07	Hapluderte crómico	42,9	56	542	402	8,0	6,7	8389
3	11	Villegas	2007/08	Hapludol típico	25,0	492	304	204	6,2	14,5	9112
	12	Marcos Juarez	2006/07	Argiudol típico	33,8	171	602	227	6,4	20,2	12160
	13	Paraná 1	2008/09	Hapluderte crómico	42,9	56	542	402	6,5	34,7	5256
	14	Parana 3	2007/08	Argiudol vértico	29,9	70	660	270	6,8	12,8	9538
	15	Parana 4	2007/08	Argiudol ácuico	26,5	48	679	273	6,7	17,0	7420

En este estudio, fueron seleccionados 15 sitios de dicha red de experimentos de fertilización fosfatada (Figura 4.1), de acuerdo a su nivel de P-Bray1 y RR<sub>m</sub>, y su posición relativa respecto a los cuadrantes determinados por el procedimiento de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1971). Se seleccionaron 5 sitios de cada cuadrante (1, 2 y 3, Figura 4.2), definidos por un nivel crítico de P-Bray1 de 12 mg kg<sup>-1</sup> y RR<sub>m</sub> de 0,90 (Barbagelata, 2011). Se consideró la posición relativa de cada sitio en los cuadrantes del procedimiento estadístico de Cate y Nelson de acuerdo a Dahnke y Olson (1990) (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Sitios seleccionados en los cuadrantes 1, 2 y 3 del gráfico de Cate y Nelson de acuerdo con el criterio de selección de un nivel crítico de P-Bray1 de 12 mg kg<sup>-1</sup> (línea vertical) y rendimiento relativo de maíz de 0,90 (Línea horizontal) (Barbagelata, 2011).

El rendimiento del cultivo de maíz fue determinado mediante una cosechadora experimental en 10 m<sup>2</sup> de área en cada parcela, y el rendimiento fue corregido a 145 g kg<sup>-1</sup> de humedad. El rendimiento relativo de maíz (RR<sub>m</sub>) fue calculado como el cociente entre el rendimiento del tratamiento control y del rendimiento del tratamiento de máxima dosis de P (Dahnke y Olson, 1990) para cada repetición en cada experimento.

Antes de la fertilización, se colectaron muestras compuestas de suelo (15-20 submuestras) en cada parcela antes de la fertilización a 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad, y fueron secadas al aire, molidas y tamizadas a 2 mm. En cada muestra se determinó materia orgánica del suelo (MO) (Walkey y Black, 1934), pH (Van Lierop, 1990), P-Bray1 (Bray y Kurtz, 1945), y textura (Gee y Bauder, 1986). Las muestras fueron almacenadas en un ambiente fresco y seco hasta la realización de esta Tesis.

Las muestras de suelo fueron fraccionadas y el P total, inorgánico y orgánico en la fracción gruesa del suelo fue determinado como fue descrito en el Capítulo 3 Sección 2.3 de esta Tesis. El P inorgánico y orgánico en extractos de NaHCO<sub>3</sub> fue determinado como fue descrito en el Capítulo 2 sección 2.3 de esta Tesis. Los valores de cada fracción de P a 0-20 cm de profundidad fueron calculados como el promedio ponderado de los valores de cada fracción a 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad.

## 2.2. Características del sitio con cultivo de soja:

Se utilizó el experimento de larga duración detallado en la Sección 2 del Capítulo II de esta Tesis. Para ello, se utilizaron los datos de rendimiento del cultivo de soja y de las fracciones de P del suelo.

## 2.3. Análisis estadístico

### 2.3.1. Cultivo de maíz

Los análisis estadísticos descriptivos para el set completo de datos y agrupados por cuadrante del procedimiento de Cate y Nelson (1, 2 y 3) fue calculado utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Las diferencias entre medias de las fracciones de P agrupadas por cuadrante fueron evaluadas por una prueba de t ( $p < 0,05$ ). Se ajustó un modelo lineal entre la proporción Po/Pt en FG y MO.

Además, se incluyó un análisis multivariado (análisis de componentes principales, CP) realizado mediante el procedimiento *prcomp* del paquete *factoextra* de R (R Core Team, 2013). Para el CP se consideraron las variables: arcilla, pH, MO, P-Bray1, Pi-Bic, Po-Bic, Pi-FG y Po-FG. Sólo los dos primeros ejes (Eje CP1, y CP2) fueron graficados, y la interpretación de las correlaciones fue realizada acorde a Maltese et al. (2019).

Las relaciones entre el  $RR_m$  y las fracciones de P del suelo fueron descritas por relaciones lineal-plateau ajustadas utilizando TableCurve 5.0 (Systat Software Inc) y graficadas mediante GraphPaD. Los errores de clasificación ( $Error_{clas}$ ) fueron calculados como el número de sitios (en relación al número de sitios evaluados,  $n=15$ ) con  $RR_m$  mayor a 0,90 y un valor de la fracción de P debajo del nivel crítico estimado para cada fracción de P.

### 2.3.2. Cultivo de soja

Se utilizaron los datos de rendimiento del cultivo de soja del suelo Vertisol del experimento de larga duración utilizado en el Capítulo II de esta Tesis. La relación entre el rendimiento del cultivo de soja con el P-Bray1, Pt-FG, Po-FG y Pt-Bic en el Vertisol fueron descritas por modelos lineal-plateau ajustados con TableCurve 5.0 (Systat Software Inc).

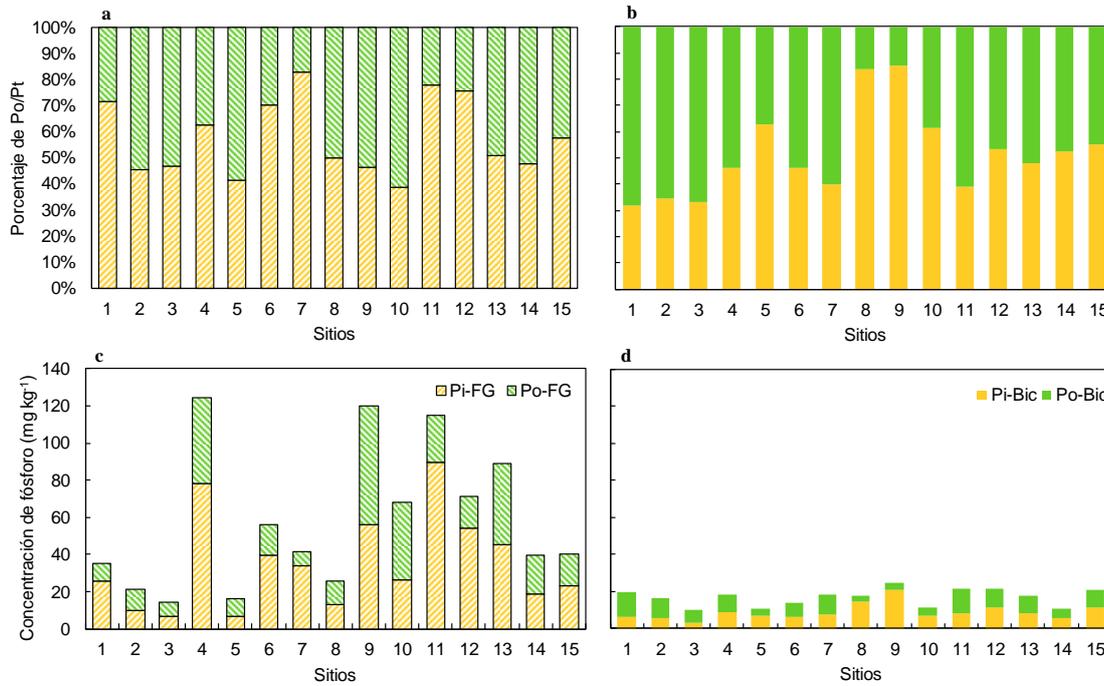
## 3. Resultados

### 3.1. Cultivo de maíz

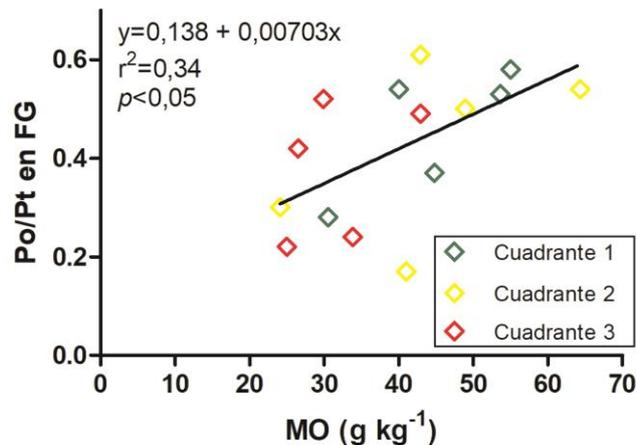
#### 3.1.1. Respuesta en rendimiento de maíz a la fertilización fosfatada y las fracciones lábiles de P.

El rendimiento de maíz varió entre 4239 y 12292 kg ha<sup>-1</sup> en los sitios estudiados (Cuadro 4.1). No se encontraron diferencias en el rendimiento de maíz al comparar los sitios por cuadrantes (1, 2 y 3) ( $p > 0,05$ ), mientras que el  $RR_m$  en los sitios del cuadrante 1 fue significativamente menor que  $RR_m$  en los sitios del cuadrante 2 y 3 ( $p < 0,01$ ).

El P orgánico en la FG varió entre 7 y 64 mg kg<sup>-1</sup>, y el Pi-FG varió entre 7 y 90 mg kg<sup>-1</sup> en todos los sitios. El P en los extractos de NaHCO<sub>3</sub> mostró un rango estrecho de variación tanto en la fracción orgánica (3-13 mg kg<sup>-1</sup>) como en la inorgánica (3-21 mg kg<sup>-1</sup>). La proporción de P orgánico en la FG varió de 0,17 a 0,61, y en los extractos de NaHCO<sub>3</sub> varió de 0,15 a 0,68 (Figura 4.3). No hubo relación entre la proporción de P orgánico en FG y el P orgánico en extractos de NaHCO<sub>3</sub> ( $r^2=0,26$ ,  $p > 0,05$ ). La proporción Po / Pt en FG y en los extractos de NaHCO<sub>3</sub> no difirió entre los sitios agrupados por cuadrantes ( $p > 0,05$ ). La proporción Po / Pt en la FG mostró una relación positiva significativa con la MO (Figura 4.4), ya que, con una mayor MO, los suelos tuvieron una mayor proporción de Po en la FG.

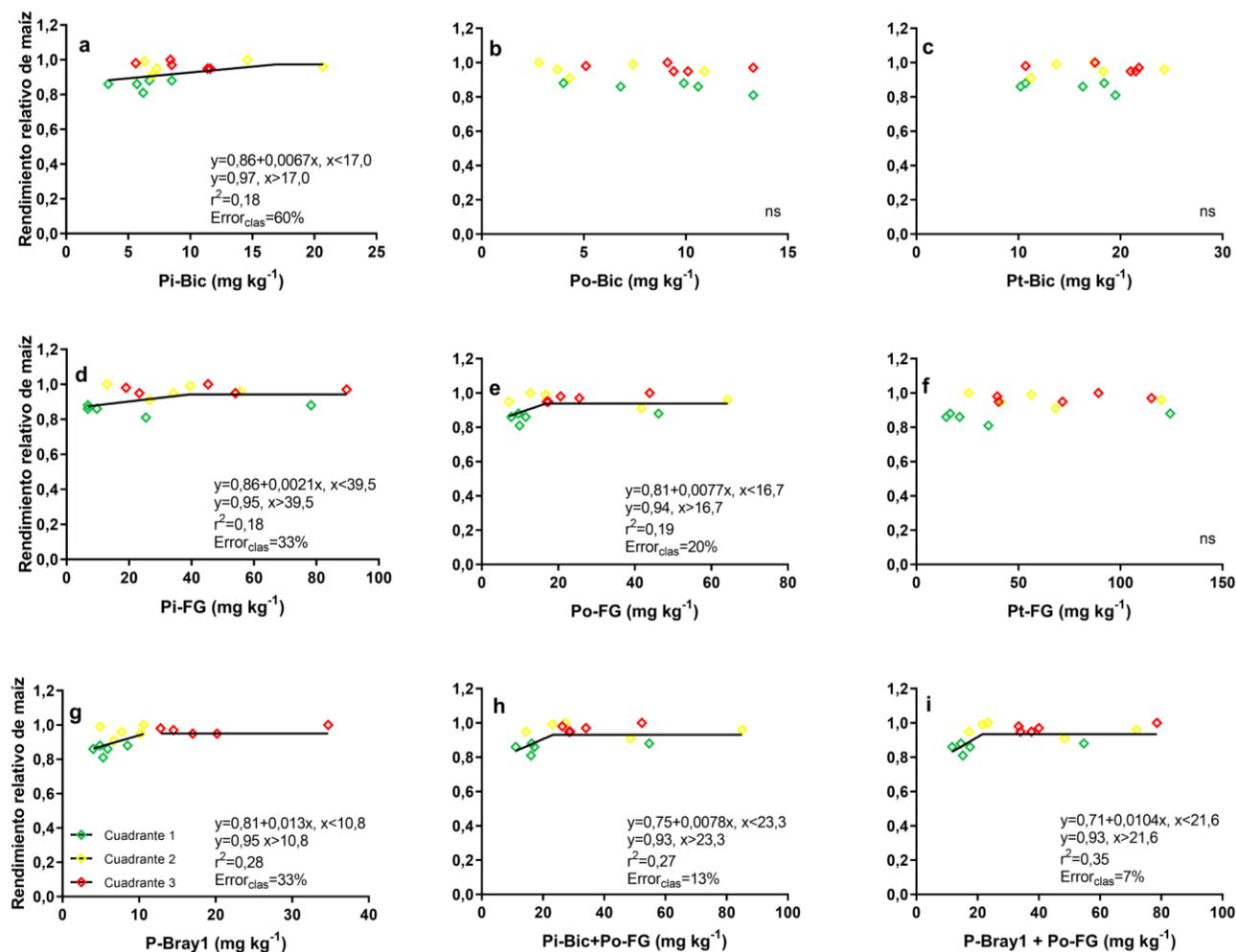


**Figura 4.3.** Proporción de fósforo inorgánico y orgánico en a) fracción gruesa del suelo (Pi-FG y Po-FG, respectivamente) y b) extractos de  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic y Po-Bic, respectivamente) en los sitios estudiados de la red de fertilización fosfatada de maíz. Contenido de fósforo en c) fracción gruesa del suelo (Pi-FG y Po-FG, respectivamente), y d) extractos de  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic y Po-Bic, respectivamente).



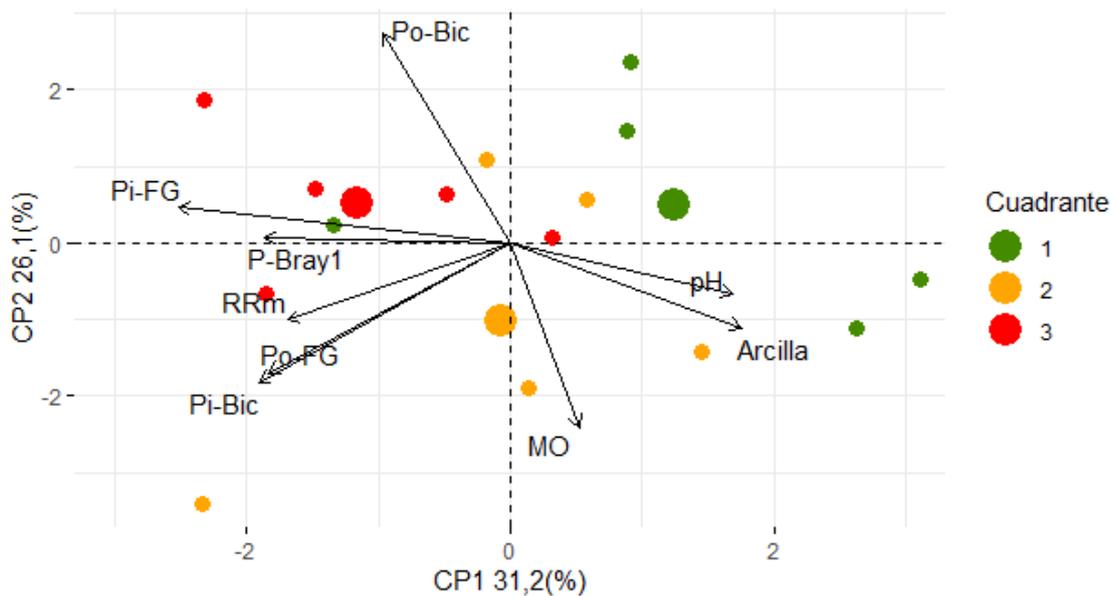
**Figura 4.4.** Relación entre el contenido de materia orgánica del suelo (MO) y la proporción de P orgánico en el P total (Po / Pt) de la fracción gruesa del suelo (FG).

La relación entre  $\text{RR}_m$  y las diferentes fracciones de P se muestra en la Figura 4.5. Las relaciones que fueron estadísticamente significativas fueron  $\text{RR}_m$  vs. P-Bray1, Pi-Bic, Pi-FG, Po-FG, P-Bray1+ Po-FG y Pi -Bic + Po-FG. A 0-20 cm de profundidad, solo el índice de P-Bray1+Po-FG ( $r^2 = 0,35$ ) mostró una mejora moderada en su ajuste respecto al P-Bray1 por si solo ( $r^2 = 0,28$ ). Además, el  $\text{Error}_{\text{clas}}$  del Po-FG y los índices combinados como P-Bray1+ Po-FG y Pi -Bic + Po-FG, fueron más bajos que el  $\text{Error}_{\text{clas}}$  del P-Bray1. El índice P-Bray1+ Po-FG redujo el  $\text{Error}_{\text{clas}}$  del P-Bray1 en un 26% y el índice Pi-Bic + Po-FG lo redujo en un 20%.



**Figura 4.5.** Relación entre el rendimiento relativo del maíz ( $RR_m$ ) y: a) P inorgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pi-Bic) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), b) P orgánico en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Po-Bic) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), c) P total en extracto de  $\text{NaHCO}_3$  (Pt-Bic) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), d) P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (Pi-FG) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), e) P orgánico en la fracción gruesa del suelo (Po-FG) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), f) P total en la fracción gruesa del suelo (Pt-FG) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), g) P-Bray1 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), h) Pi-Bic + Po-FG ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), i) P-Bray1+ Po-FG ( $\text{mg kg}^{-1}$ ). Todas las funciones ajustadas que se muestran fueron significativas ( $p < 0,05$ ). Error<sub>clas</sub> = errores de clasificación.

En el ACP, los dos primeros ejes explicaron el 57% de la variabilidad total (Figura 4.6 y Cuadro 4.2). Para CP1, Pi-FG y P-Bray1 recibieron los pesos negativos más altos, que se asociaron con el cuadrante 3. La arcilla y el pH recibieron los pesos positivos más altos asociados con el cuadrante 1. Por lo tanto, el CP1 permitió discriminar los cuadrantes 1 y 3 del cuadrante 2, que se ubicaron en una posición intermedia respecto al eje. Los cuadrantes 1 y 3 fueron claramente discriminados del cuadrante 2 por el CP2, lo que estuvo estrechamente vinculado con el Po-Bic. El cuadrante 2 se asoció positivamente con Po-FG, RR<sub>m</sub> y Pi-Bic, y se asoció negativamente con el contenido de arcilla. El P orgánico en la FG no se asoció con el cuadrante 1, pero se asoció con los cuadrantes 2 y 3 (Figura 4.6).



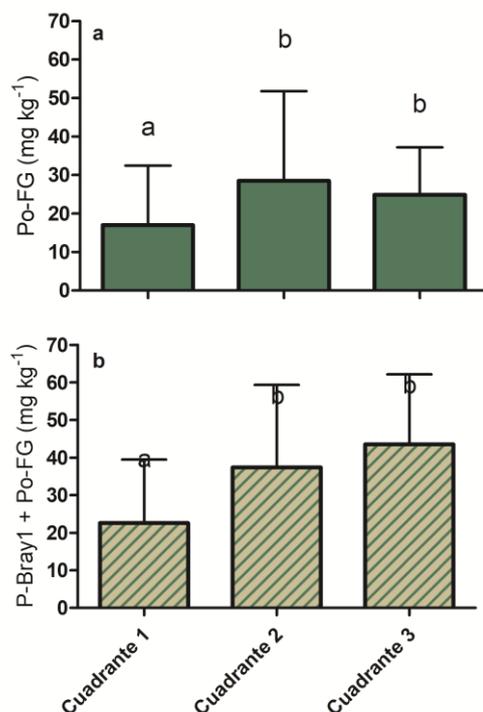
**Figura 4.6.** Análisis de componentes principales (CP). Los sitios agrupados por cuadrantes del método de Cate y Nelson se graficaron en función de las fracciones de P del suelo, las características del suelo y el rendimiento relativo del maíz (vectores). Los vectores de línea corresponden al rendimiento relativo del maíz (RR<sub>m</sub>), pH, materia orgánica del suelo (MO), contenido de arcilla del suelo (arcilla), P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en la FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Po-Bic). Círculos grandes representan los promedios para cada cuadrante, círculos pequeños representan los valores individuales de cada sitio

**Cuadro 4.2.** Valores de los vectores e1 y e2 resultantes del análisis de componentes principales (CP) para el rendimiento relativo del maíz ( $RR_m$ ), pH, materia orgánica del suelo (MO), contenido de arcilla en el suelo (Arcilla), P-Bray1, P inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pi-FG), P orgánico en FG (Po-FG), P inorgánico en extracto de  $NaHCO_3$  (Pi-Bic) y P orgánico en extracto de  $NaHCO_3$  (Po-Bic).

Variables	e1	e2
Pi-FG	-0,49	0,1
Pi-Bic	-0,37	-0,38
P-Bray1	-0,36	0,02
Po-FG	-0,36	-0,36
$RR_m$	-0,33	-0,21
Po-Bic	-0,19	0,58
MO	0,1	-0,51
pH	0,33	-0,14
Arcilla	0,34	-0,24

### 3.1.2. Fracciones de P orgánico lábil en sitios agrupados por su nivel de P-Bray1 y Rendimiento Relativo (cuadrantes 1, 2 y 3 de Cate y Nelson)

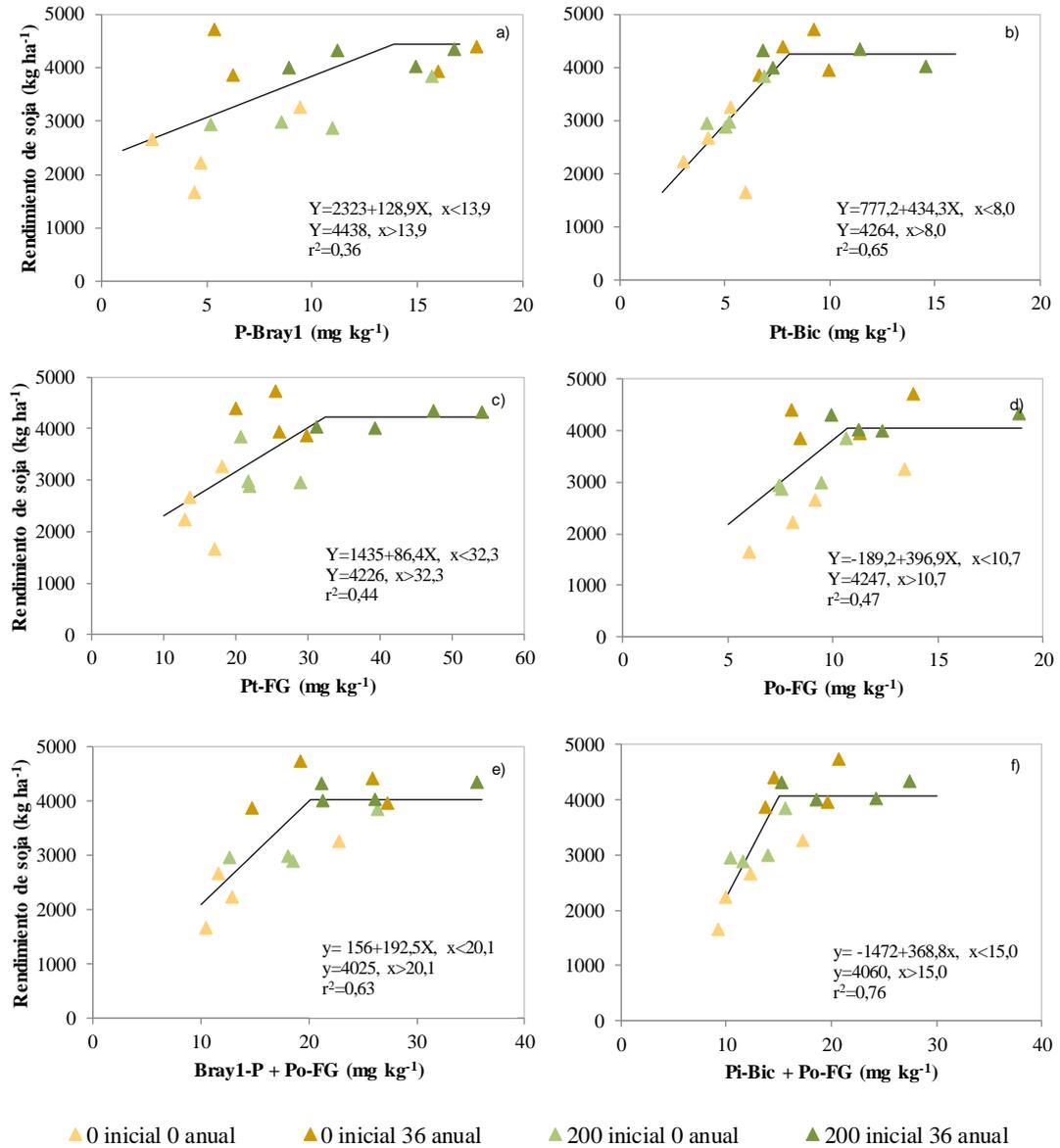
El contenido de Po-Bic en los sitios del cuadrante 2 fue significativamente más bajo que en los sitios del cuadrante 1 y 3. El contenido de Po-FG en los sitios del cuadrante 1 mostró valores significativamente más bajos que los sitios del cuadrante 2 y 3, que no mostraron diferencias entre ellos (Figura 4.7a). De esta manera, se demostró que el aporte de Po-FG en los sitios del cuadrante 2 podría explicar la falta de respuesta en dichos sitios. Además, al considerar la fracción P-Bray1+Po-FG, los sitios del cuadrante 2 y 3 no mostraron diferencias en el contenido de P (Figura 4.7b). La integración de las fracciones inorgánicas y orgánicas de P en un índice que estima la disponibilidad de P para el cultivo de maíz permitió diferenciar sitios con (cuadrante 1) y sin respuesta de maíz (cuadrante 2 y 3) a la fertilización fosfatada.



**Figura 4.7.** Promedio de las fracciones de P de los sitios de la red de fertilización fosfatada de maíz agrupados por cuadrantes del método de Cate y Nelson (1, 2 y 3): a) P orgánico en la fracción gruesa del suelo (Po-FG), y b) P-Bray1 más Po-FG. Letras diferentes se refieren a diferencias significativas entre los cuadrantes ( $p < 0,05$ ).

### 3.2. Cultivo de soja

Las fracciones de P del suelo (0-20 cm de profundidad) que más aumentaron con la fertilización con P a largo plazo en el Capítulo II se relacionaron con el rendimiento en grano de soja en el Vertisol (Figura 4.8). El rendimiento en grano de maíz no aumentó con la fertilización con P en el Molisol debido a la alta disponibilidad de P en el suelo, y por lo tanto no fue considerado en este análisis (Capítulo II). Entre las fracciones de P del suelo que más aumentaron con la fertilización con P a largo plazo, el Pt-Bic mostró el mayor coeficiente de determinación en su relación con el rendimiento en grano (Figura 4.8). El Po-FG tuvo un desempeño similar al Pt-FG en su relación con el rendimiento en grano, y ambos tuvieron un coeficiente de determinación más alto que el P-Bray1. Es válido mencionar que este último método es utilizado como análisis de rutina en Argentina. Cuando las fracciones de P inorgánico (P-Bray1 y Pi-Bic) se combinaron con una fracción de P orgánico tal como Po-FG, se obtuvo un mejor ajuste respecto a las fracciones individuales (Figura 4.8e y f).



**Figura 4.8.** Relaciones entre el rendimiento en grano de soja y las fracciones de P seleccionadas a 0-20 cm de profundidad en el Vertisol: a) P-Bray1 (mg kg<sup>-1</sup>), P total en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), c) P total en la fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), y d) P orgánico en FG (Po-FG) (mg kg<sup>-1</sup>) e) P-Bray1 más Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>), y f) P inorgánico en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic) más Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>). Todas las relaciones ajustadas fueron estadísticamente significativas ( $p<0,05$ ). Referencias: 0 inicial 0 anual = 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 0 inicial 36 anual = 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 0 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual, 200 inicial 36 anual = 200 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> en la fertilización anual.

## 4. Discusión

### 4.1. Cultivo de maíz

El rendimiento de maíz obtenido en este estudio presentó un amplio rango de variación entre los sitios y se encontró dentro de los rendimientos comúnmente reportados para la Región Pampeana Argentina (Aramburu Merlos et al., 2015). Del mismo modo, los valores de P-Bray1 presentaron un amplio rango de variación, que fue representativo de la red de fertilización analizada, e incluyó niveles de P-Bray1 bajo, medio y alto, según Sainz Rozas et al. (2013). Los valores de Pt-Bic y Pi-Bic estuvieron dentro del rango previamente informado en suelos similares (Appelhans et al., 2016; Recena et al., 2019).

Otros autores han informado valores más bajos de Pt-FG y Po-FG (Ciampitti et al., 2011; Wyngaard et al., 2013) que los valores aquí informados, pero los valores de Pt-FG medidos en esta red coincidieron con estudios previos en la Región Pampeana Argentina (Appelhans et al., 2016). La proporción de Po / Pt en la FG aumentó a medida que aumentó la MO (Figura 4.4), lo que sugiere que esta proporción podría aumentar utilizando las prácticas de manejo generalmente recomendadas para aumentar la MO, es decir, la siembra directa, la intensificación de cultivos y la fertilización con P.

El Po-FG es una fuente potencial de P para los cultivos, que puede mineralizarse durante la estación de crecimiento del cultivo (Ha et al., 2008), y se ha informado como un indicador de la mineralización potencial de P (Wyngaard et al., 2016), pero su contribución al P disponible depende de que se den las condiciones adecuadas para la mineralización (Condrón et al., 2005). Por ejemplo, el P orgánico en la FG mostró una alta relación con el rendimiento de la soja (Figura.4.8). Aunque esta fracción mostró un menor  $Error_{clas}$  que el P-Bray1 *per se*, los resultados sugieren que ambas fracciones deben considerarse para estimar el P disponibles para los cultivos.

Al considerar ambas fracciones de P disponible, como un índice integrado por fracciones de P orgánico e inorgánico (es decir, P-Bray1+Po-FG, Figura 4.5.i) se mejoró el ajuste del modelo considerado. Por lo tanto, se demostró que un enfoque integrador para determinar el P disponible, incluido el P orgánico e inorgánico, puede ser útil para mejorar las recomendaciones de fertilización fosfatada en maíz. En varios estudios se ha recomendado la inclusión de la fracción de P orgánico en los análisis de suelo para tener en cuenta la mineralización de P (Sharpley, 1985; Steward y Sharpley, 1987; Steffens et al., 2010; Ciampitti et al., 2011; Wyngaard et al., 2013; Belinque et al., 2015; Appelhans et al., 2016), pero resulta necesario destacar que los niveles críticos de estas fracciones deberían obtenerse en base a un conjunto de datos más amplio.

Los suelos con P-Bray1 por debajo del nivel crítico y altos  $RR_m$ , i.e. los sitios del cuadrante 2, mostraron un Po-FG significativamente mayor comparado con los sitios del cuadrante 1. Como se anticipó, el Po-FG podría ser una fuente de P disponible para los cultivos (Wyngaard et al., 2016) en sitios del cuadrante 2, que no mostraron respuesta en rendimiento a la fertilización con P. Además, P-Bray1+Po-FG, utilizado como índice de diagnóstico, permitió obtener un error de clasificación más bajo en el cuadrante 2 con respecto al P-Bray1 por sí solo. Por lo tanto, el enfoque experimental utilizado permitió confirmar la hipótesis. Los resultados de este capítulo muestran que el error tipo 2, i.e. casos en el modelo recomienda la fertilización con P cuando no es necesario (Heckman et al., 2006), podría atribuirse al suministro de P a partir de la fracción de P orgánica. En dichos casos se observaron los mayores niveles de Po-FG, lo que refuerza la posibilidad de que los aportes de P provengan de la fracción orgánica.

#### 4.2. Cultivo de soja

El Pt-Bic tuvo una relación más estrecha con el rendimiento en grano de soja que el P-Bray1 en el Vertisol (Figura 4.8), lo que sugiere que el Pt-Bic podría considerarse para el desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico de la fertilidad fosfatada en Vertisoles. Se ha observado que en los suelos con niveles bajos de P-Bray1, el P disponible se repondría con las fracciones de P del suelo que no son medidas en el P-Bray1 (Sucunza et al., 2018). Por lo tanto, en el Vertisol, una mayor proporción del  $P_{acum}$  podría ser suministrada por las fracciones de P inorgánicas y orgánicas lábiles, ambas incluidas en el Pt-Bic, que repondrían el P disponible para el cultivo de soja, y, en consecuencia, el Pt-Bic mostró ser un índice más preciso para evaluar la disponibilidad de P en el Vertisol.

Del mismo modo, el Pt-FG y Po-FG se relacionaron mejor con el rendimiento de soja que el P-Bray1, pero estos resultados no coincidieron con un estudio previo. En efecto, Appelhans et al. (2016), mostraron que el Pt-FG no estaba relacionado con la respuesta en rendimiento de soja a la fertilización con P, incluyendo suelos con un amplio rango de variación en las diferentes fracciones de P, textura contrastante, diferentes cultivos antecesores y condiciones ambientales durante la estación de crecimiento del cultivo. El Po-FG no se correlacionó con el  $P_{acum}$  de soja, pero mostró un mayor ajuste con el rendimiento en grano de soja que el P-Bray1. Cabe aclarar, que se esperaba que la mineralización de las fracciones de P orgánico durante la estación de crecimiento del cultivo fuese una fuente importante de P. Sin embargo, el P inorgánico es otra fuente importante de P disponible para un cultivo (Sharpley, 1995).

Para tener en cuenta ambas fuentes de P, los índices (P-Bray1+ Po-FG y el Pi-Bic + Po-FG) mostraron una estrecha relación con el rendimiento de soja en el Vertisol destacando la importancia de considerar ambas fuentes de P disponibles para los cultivos, tanto orgánicas como inorgánicas. Desde un punto de vista práctico, las determinaciones de P total, requeridas para calcular Po-FG, consumen más tiempo, son laboriosas y, en consecuencia, aumentan los costos operativos. Estos índices de P disponible fueron más precisos, pero agregarían complejidad a las determinaciones de rutina de los análisis de suelo. De esta manera, se debería focalizar en desarrollar una metodología simple para estimar la disponibilidad de P que incluya las fracciones orgánica e inorgánica lábiles en un solo paso.

### 5. Conclusiones

La inclusión de fracciones de P orgánico lábil como Po-FG en la estimación de P disponible para el cultivo de maíz mejora la relación con el rendimiento relativo en comparación con el P-Bray1 *per se* en sitios seleccionados de una amplia red de fertilización fosfatada en la región pampeana Argentina. Asimismo, su empleo reduce los errores de clasificación de la metodología cuando se incluye como índice de disponibilidad de P del suelo. Además, los índices propuestos que incluyeron el P inorgánico y orgánico lábil, como el P-Bray1 + Po-FG y el Pi-Bic + Po-FG mostraron una fuerte relación con el rendimiento en grano de soja en el suelo Vertisol, resultando en un enfoque integrado para evaluar la disponibilidad de P del suelo. Las fracciones de P que incluyeron fracciones de P orgánico lábil mostraron resultados alentadores respecto a su posible inclusión para mejorar el diagnóstico de la fertilidad fosfatada del suelo en el cultivo de soja y maíz.

Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis planteada en este capítulo y son prometedoras para obtener una determinación más precisa de los sitios que no responden a la fertilización fosfatada, lo que puede reducir el impacto de estos errores

de clasificación cuando sólo se utiliza el P-Bray1 para estimar el P disponible para el cultivo de maíz y soja.

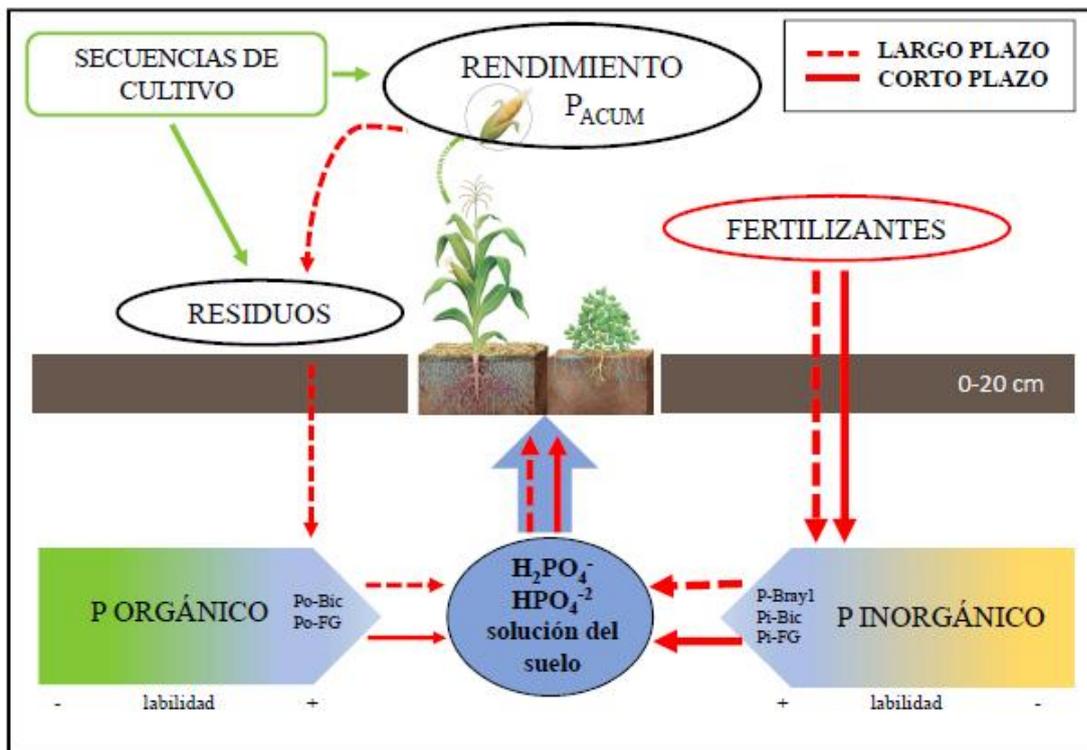
## **Capítulo V**

### **Conclusiones Generales**

En el presente capítulo final se realiza una síntesis integradora de las principales conclusiones de esta tesis, discutiéndose sus resultados más relevantes, y comprobando en qué medida estos resultados permitieron reunir o no evidencias suficientes para aceptar o no las hipótesis que fueron planteadas. Por último, se describe la utilidad de la información generada y las posibles líneas de investigación que surgieron en el marco de esta tesis.

### 3.4. Discusión global de los resultados obtenidos

Los suelos poseen grandes cantidades de fracciones orgánicas de P que no son tenidas en cuenta en los análisis rutinarios que permiten evaluar la disponibilidad de P para los cultivos (Suñer et al., 2002; Steffens et al., 2010; Ciampitti et al., 2011b). Cuando se utilizan índices de disponibilidad de P basados sólo en fracciones inorgánicas, como el P-Bray1, usualmente se encuentran cultivos de soja y maíz con ausencia de respuesta a la fertilización fosfatada en suelos con bajos contenidos de P (Melchiori et al., 2008; Gutierrez Boem et al., 2010; Barbagelata, 2011; Appelhans et al., 2016). Se estima que existe un aporte desde fracciones de P orgánicas al P disponible para los cultivos, que no son cuantificadas en este índice, por lo que el objetivo general de esta Tesis fue evaluar el aporte de las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo ante diferentes dosis de fertilización fosfatada y secuencias de cultivo, y su aporte al diagnóstico de la fertilidad fosfatada en maíz y soja. Se evaluó la variación de las fracciones orgánicas de P ante diferentes dosis aplicadas de fertilizantes fosfatados en el largo plazo (Capítulo II) y en el corto plazo con diferentes secuencias de cultivo (Capítulo III) en suelos Molisoles y Vertisoles, y la relación entre las fracciones orgánicas de P con los rendimientos y el P acumulado en la biomasa en los cultivos de maíz y soja (Capítulo II, III y IV) (Figura 5.1).



**Figura 5.1.** Esquema integrador de los principales resultados de la Tesis

En los primeros capítulos de esta Tesis se puso a prueba la hipótesis planteada que postulaba que *las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo se incrementaban con la fertilización fosfatada en el largo plazo cuando el balance aparente de P es positivo, se incrementaban en función de la intensidad de la secuencia de cultivos, y que eran menos afectadas por la intensidad de la secuencia de cultivos y la fertilización fosfatada en un Vertisol que en un Molisol*. Para ponerla a prueba, en el Capítulo II se evaluaron los cambios en las fracciones de P inorgánico, orgánico y total extraídas con  $\text{NaHCO}_3$  y las mismas fracciones de P en la fracción gruesa y fina del suelo. Un hallazgo novedoso surgió al determinar cuál/es fracciones se modificaban más con la fertilización fosfatada en el corto y largo plazo en dos suelos diferentes. En el corto plazo, y a un año de la fertilización con P sólo se modificaron las fracciones inorgánicas de P tanto en el ensayo de fertilización fosfatada (Capítulo II) como en el de secuencias de cultivo (Cuadro 3.3, Capítulo III) (Figura 5.1). En el largo plazo, principalmente incrementaron las fracciones inorgánicas de P en ambos suelos como había sido reportado anteriormente (Guggenberger et al., 2000; Bunemann et al., 2006; McLaughlin et al., 2011; Wyngaard et al., 2013), y todas las fracciones orgánicas de P sólo en el Molisol (Cuadro 2.3 y 2.4). En el Molisol, las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo se incrementaron con la fertilización fosfatada en el largo plazo, pero no en el Vertisol, donde la productividad y el aporte de residuos es menor (Caviglia et al., 2011, Novelli et al., 2017) sumado a la mayor capacidad de retención de P (Boschetti et al., 1998). Una limitante experimental al trabajo de fertilización reportado en el Capítulo II, fue la falta de respuesta del cultivo a la adición de P debido a los elevados niveles nativos de P del suelo en el Molisol, que probablemente también derivó en la falta de correlación observada entre las fracciones de P del suelo y las variables registradas en el cultivo de maíz.

En el Capítulo III se evaluaron las fracciones de P del suelo en diferentes secuencias de cultivo: S-S, T/S y M-M con y sin fertilización fosfatada. Las secuencias de cultivo no incrementaron las fracciones orgánicas de P diferencialmente (Cuadro 3.3 y 3.4), así como lo hizo la fertilización fosfatada, indicando que posiblemente las fracciones orgánicas de P dependan más del balance de P (Figura 2.2) que del aporte de la materia orgánica (Cuadro 3.2). Sin embargo, el Po-FG se asoció con las secuencias de cultivo de mayor cantidad de aporte de residuos (M-M y T/S) (Figura 3.3) en el suelo Molisol. De esta manera, en sistemas de elevada productividad donde se incrementa el Po-FG, es posible que se incremente el aporte de P orgánico al P disponible para los cultivos. Un ejemplo de ello se evidenció en el suelo Molisol en los tratamientos fertilizados anualmente del experimento de larga duración (Cuadro 2.2). Además, se realizaron aportes originales al conocimiento en cuanto a que luego de 8 años las secuencias de cultivo S-S, M-M y T/S no afectaron a las fracciones de P en la FG del suelo en ningún suelo, indicando que posiblemente se requiera mayor reciclado y aporte de residuos para modificarlas. Además, debido a que dicho P tiene su origen en los residuos de los cultivos previos, su contenido dependerá del  $P_{\text{acum}}$  y el ICP de cada secuencia (Cuadro 3.1).

Una limitación del Capítulo III de esta Tesis es que no hubo balances de P contrastantes, i.e. no existieron situaciones de déficit de P, en los experimentos dada la historia previa de fertilización del experimento. Sería esperable que, en situaciones de déficit de P, se magnifique el aporte relativo de P desde las fracciones orgánicas en secuencias de cultivo con mayor aporte de residuos. Otra limitación del Capítulo II y III es que se analizaron los efectos a largo plazo de la fertilización fosfatada y de las secuencias de cultivo por separado, no pudiendo evaluar su interacción, y cómo se modifican las fracciones orgánicas de P luego de muchos años de balances aparentes

contrastantes de P y de C. Para ello se debería contar con un experimento de larga duración diseñado con el objetivo de evaluar esta posible interacción.

Un hallazgo novedoso de esta Tesis fue que, en el Molisol, las fracciones orgánicas de P del suelo se modificaron en mayor magnitud que en el Vertisol tanto con la fertilización fosfatada como en las secuencias de cultivo. En este sentido, los resultados demostraron que en el Molisol el impacto de las secuencias de cultivo fue mayor que en el Vertisol debido a la mayor productividad (Novelli et al. 2017) y reciclaje de P a través de los residuos de los cultivos (Figura 3.3). Además, en los Vertisoles las arcillas esmectíticas pueden proteger la materia orgánica de la mineralización (Fabrizzi et al., 2009), adsorber en mayor proporción el P (Boschetti et al., 1998; Quinteros et al., 2003) y, por lo tanto, podrían reducir el impacto de la intensificación de las secuencias de cultivo y la fertilización fosfatada en las fracciones orgánicas de P. De esta manera, se aceptó la hipótesis de que *las fracciones orgánicas lábiles de P eran menos afectadas por la secuencia de cultivos y la fertilización fosfatada en un Vertisol que en un Molisol*.

Otro hallazgo original de esta Tesis fue que tanto en el Molisol como en el Vertisol, los contenidos de P en la fracción gruesa del suelo fueron similares (Capítulo II y III), si bien el aporte de residuos por los cultivos es menor en el Vertisol (Novelli et al., 2017). Esta fracción del suelo está compuesta por residuos de los cultivos parcialmente descompuestos (Ha et al. 2008), y su concentración parece ser menos dependiente del tipo de suelo que las demás fracciones lábiles de P obtenidas con extractantes químicos, tal como se demostró en las relaciones del balance aparente de P en el largo plazo y el Pt-FG (Figura 2.2). Es decir, que dichas fracciones de P podrían ser de utilidad como índice de diagnóstico de disponibilidad de P independientemente del tipo de suelo. Aunque, en general, se ha demostrado que los niveles críticos utilizados en la actualidad en base al P-Bray1 dependen del tipo de suelo (Correndo, 2018).

A su vez, se evaluaron dos profundidades de muestreo, 0-5 cm y 0-20 cm debido a la estratificación del P comúnmente reportada en los sistemas en siembra directa (Capítulo II y III) (Selles et al., 1995). Sin embargo, no se encontraron ventajas de las mediciones realizadas a una profundidad de 0-5 cm respecto a 0-20 cm en las relaciones o índices de disponibilidad de P. Por lo tanto, en el Capítulo IV sólo se utilizó una profundidad de muestreo de 0-20 cm, tal como se realizan comúnmente los muestreos de suelo para evaluar disponibilidad de P (Sainz Rozas et al., 2013).

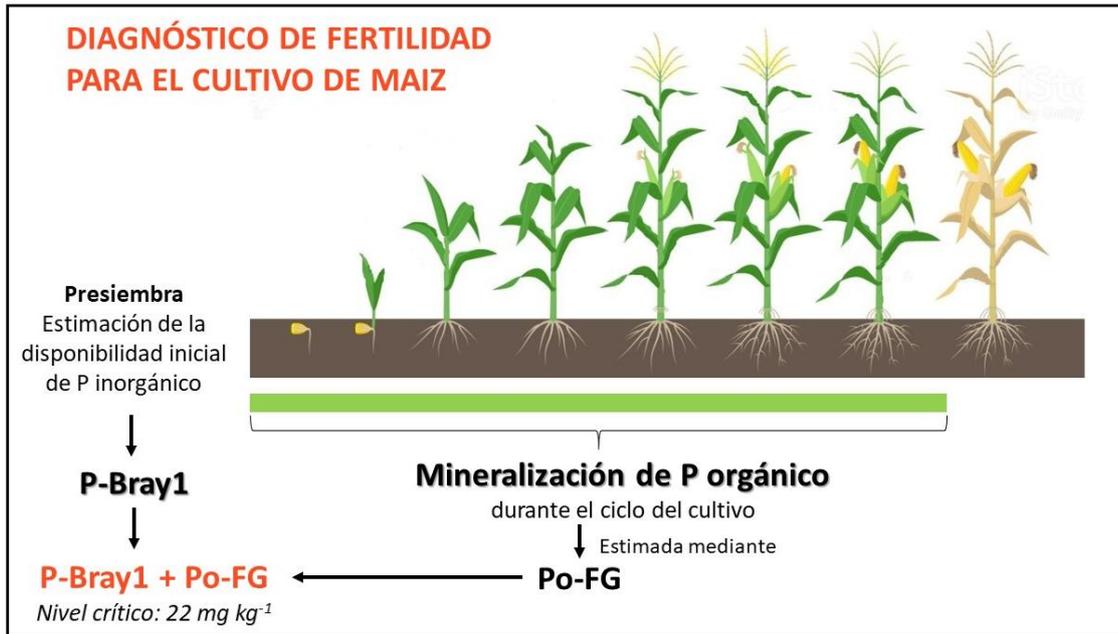
Tanto en el Capítulo II como en el Capítulo III se puso a prueba la hipótesis de que *las fracciones orgánicas lábiles de P del suelo se relacionan positivamente con el  $P_{acum}$ , la concentración de P en grano, y el rendimiento en grano de los cultivos de soja y maíz* (Figura 5.1). En el Molisol, el Pt-FG se correlacionó positivamente con la respuesta en rendimiento en grano a la fertilización con P y el Po-FG con el rendimiento del maíz, la respuesta en rendimiento en grano y el  $P_{acum}$  (Cuadro 2.6) (Capítulo II). Asimismo, en el Capítulo III, las secuencias de cultivo T/S y M-M se asociaron a los mayores rendimientos y  $P_{acum}$  debido a su productividad (Cuadro 3.2), asociándose también al Po-FG en el Molisol. En el Molisol se rechazó parcialmente dicha hipótesis debido a que en general no se obtuvo un amplio rango de variación en rendimientos que permita evaluar estas relaciones. En cambio, en el Vertisol, todas las fracciones que más aumentaron con la fertilización fosfatada e incluyeron el P orgánico se correlacionaron con el rendimiento de grano de soja, el  $RR_s$ ,  $P_{acum}$  y la concentración de P en grano (Cuadro 2.6), confirmando la hipótesis planteada.

La hipótesis que postulaba que *la incorporación de fracciones orgánicas lábiles de P al método de diagnóstico tradicional basado en la determinación de P-Bray1*

mejora la capacidad predictiva de la respuesta de los cultivos de maíz y soja a la fertilización fue testada en el capítulo IV. Para testear dicha hipótesis se evaluaron índices de disponibilidad de P que incluyeran el P orgánico en comparación al índice de P-Bray1 (Figura 4.8) en el cultivo de soja en un suelo Vertisol. Un aporte novedoso fue que dos de los índices evaluados que incluyeron el P orgánico (P-Bray1+ Po-FG y Pi-Bic + Po-FG) mostraron una estrecha relación con el rendimiento de soja en el suelo Vertisol y mostraron mayor ajuste que el índice de P-Bray1, destacando la importancia de considerar ambas fuentes de P disponibles para los cultivos.

Luego, la misma hipótesis fue testada en el cultivo de maíz, pero no en un solo sitio como en el cultivo de soja sino para una red de experimentos de fertilización fosfatada en la Región Pampeana argentina (Figura 4.1). Se determinaron las fracciones inorgánicas y orgánicas lábiles de P en sitios con y sin respuesta de maíz a la fertilización con P para determinar si los sitios con altos rendimientos relativos (RR) y niveles de P-Bray1 por debajo del nivel crítico calibrado en la región pampeana argentina se asociaban a un mayor nivel de fracciones orgánicas lábiles de P comparado con sitios con bajo P-Bray1 y bajo RR. En general, el P liberado de la materia orgánica del suelo contribuye a la disponibilidad de P para el cultivo (Condrón et al., 2005), y este proceso se ha descrito como especialmente importante en suelos con bajo nivel de P inorgánico disponible (Sharpley, 1985; Stewart y Sharpley, 1987; Thien y Myers, 1992; Ciampitti et al., 2011b), sin embargo, no se ha evaluado su incorporación en los diagnósticos de fertilidad fosfatada de los cultivos de maíz y soja. Otro aporte importante y novedoso es que, entre las fracciones orgánicas de P evaluadas, el Po-FG mostró mayores contenidos en los sitios con P-Bray1 por debajo del nivel crítico y altos RR<sub>m</sub> (cuadrante 2) comparado con los sitios del cuadrante 1, indicando que el Po-FG fue una fracción de potencial aporte al P disponible mediante su mineralización en dichos sitios.

Además, cuando se integró el Po-FG en el índice P-Bray1+Po-FG los sitios con y sin respuesta a la fertilización fosfatada fueron discriminados claramente. En consecuencia, las funciones lineal-plateau entre el RR y las fracciones inorgánicas y orgánicas lábiles de P tuvieron menores errores de clasificación que aquellas funciones entre RR vs. P-Bray1. El Po-FG mostró un menor Error<sub>clas</sub> que el P-Bray1 *per se*, aunque los resultados sugieren que ambas fracciones deben considerarse para estimar el P disponible para los cultivos en un enfoque integral. El índice P-Bray1+Po-FG mostró un nivel crítico de 22 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 5.2). Una limitación de este enfoque es que se asume que todo el Po-FG estará disponible para el cultivo, y la disponibilidad de dicha fracción depende de su mineralización (Wyngaard et al., 2016). Además, la determinación del Po-FG es más costosa y laboriosa respecto de la determinación del P-Bray1, por lo que su inclusión como índice complementario al P-Bray1 incrementaría los tiempos de análisis en los laboratorios. No existen antecedentes publicados acerca de índices que incluyan una fracción de P orgánico lábil para estimar la disponibilidad de P del suelo, si bien su inclusión había sido sugerida por numerosos autores (Sharpley, 1985; Steffens et al., 2010; Ciampitti et al., 2011b; Wyngaard et al., 2013). Los índices de disponibilidad de P que integran el P orgánico e inorgánico pueden ser útiles para mejorar las recomendaciones de fertilización fosfatada en el cultivo de maíz en la Región Pampeana argentina. Si bien los resultados de esta Tesis son los primeros reportados evaluando índices de disponibilidad de P que incluyan una fracción de P orgánico lábil en experimentos a campo, sería necesario ampliar la red de experimentos evaluados, y en especial para el cultivo de soja.



**Figura 5.2.** Esquema resumen de los índices sugeridos para el diagnóstico de fertilidad fosfatada del cultivo de maíz.

### Conclusión general

En el corto plazo la fertilización fosfatada sólo modifica las fracciones extractables inorgánicas de P (Figura 5.1). La fertilización de largo plazo permite incrementar las fracciones inorgánicas y orgánicas lábiles de P del suelo cuando los balances aparentes de P son positivos en los Molisoles. En cambio, en los Vertisoles la fertilización fosfatada incrementa principalmente las fracciones inorgánicas de P. En el largo plazo el Po-FG se incrementa cuando los balances aparentes de P son positivos a través de varios ciclos de reciclaje de residuos de los cultivos (Figura 5.1). En cambio, en el corto plazo, las fracciones de P asociadas a los residuos de los cultivos no se incrementan con la fertilización fosfatada. En el Molisol, donde la productividad y reciclaje de P a través de los residuos de los cultivos es mayor que en el Vertisol, es mayor el impacto de las secuencias de cultivo sobre las fracciones de P del suelo, a pesar de que las fracciones orgánicas lábiles de P no se modifican diferencialmente por las distintas secuencias de cultivo en ninguno de los suelos evaluados. Además, se demostró que las concentraciones de P en la fracción gruesa del suelo son menos dependientes del tipo de suelo que las demás fracciones lábiles de P obtenidas con extractantes químicos. Las fracciones orgánicas lábiles de P aportan al P disponible para los cultivos de maíz y soja en suelos con contenidos de P-Bray1 por debajo de los niveles críticos calibrados, permitiendo disminuir los errores de clasificación de sitios y mejorar el diagnóstico de fertilidad fosfatada del suelo.

### *3.1. Utilidad de la información generada*

La información generada en esta Tesis en ensayos de campo permitió detectar qué fracciones de P del suelo se modifican con la fertilización fosfatada en el corto y largo plazo, y con diferentes secuencias de cultivo. Además, permitió determinar cuáles de dichas fracciones se relacionan con los rendimientos y P acumulados del cultivo de soja y maíz. De esta manera, es posible establecer estrategias de manejo del P que tiendan a aumentar las fracciones orgánicas lábiles de P. Por ejemplo, en el suelo

Molisol es posible incrementar el Po-FG utilizando secuencias de cultivo que aporten gran cantidad de residuos al suelo, y fertilizándolas con P en dosis que permitan obtener balances aparentes positivos.

Se generó información original acerca de la inclusión del P orgánico en índices de disponibilidad de P del suelo en relación con el rendimiento y rendimiento relativo de los cultivos de soja y de maíz en la Región Pampeana argentina. Se destaca la pertinencia del estudio y la necesidad de evaluación de métodos complementarios al P-Bray1 que contemplen fracciones orgánicas que aporten al P disponible para los cultivos, que puedan ser incorporados en los diagnósticos de fertilidad fosfatada en sistemas en siembra directa. Dicha información resulta especialmente relevante en sitios donde el P-Bray1 no predice con precisión la probabilidad de respuesta de los cultivos a la fertilización con P. El hecho de establecer con precisión la probabilidad de respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada permitirá optimizar el uso de fertilizantes y reducir la probabilidad de excesos de fertilizantes.

### *3.2. Posibles líneas de investigación*

De esta Tesis surgieron varias líneas temáticas para profundizar:

En primer lugar, las determinaciones de Po-FG consumen mayor tiempo, costo y complejidad respecto a la determinación del P-Bray1. Por lo tanto, resulta relevante mejorar y optimizar las metodologías de determinación de dicha fracción de P de manera de simplificarlas. Asimismo, podrían evaluarse otros índices para estimar la disponibilidad de P orgánico y su mineralización, como la medición del P orgánico extractable luego de la adición de enzimas fosfatasa en extractos de suelo con  $\text{NaHCO}_3$  o NaOH y con diferentes tiempos de extracción, o la actividad fosfatasa.

Dadas las limitantes experimentales de esta Tesis, se podría profundizar el estudio de las fracciones orgánicas lábiles en Molisoles con niveles de P-Bray1 por debajo del nivel crítico para el cultivo de soja. Además, para el cultivo de soja y maíz, se deberían testear los índices combinados (i.e. P-Bray1+Po-FG) en una red de experimentos de fertilización fosfatada que incluya diferentes ambientes con niveles más bajos de P-Bray1.

Otra posible temática para profundizar es el efecto de las bacterias solubilizadoras de P (BSP) en las fracciones de P del suelo, y su relación con la eficiencia de uso de P en el cultivo de soja y maíz en suelos deficientes en P-Bray1 y alta concentración de P orgánico lábil. Si bien hay antecedentes (Silva Rossi et al., 2013), se evaluará si la inoculación con BSP incrementa la acumulación de P en el cultivo de soja y maíz debido a una mayor actividad fosfatasa en la rizósfera, incremento de la biomasa vegetativa temprana y mayor concentración de P en la biomasa vegetativa. Además, aumentaría la eficiencia de adquisición y de uso de P en el cultivo de soja y maíz, respecto al cultivo sin inoculación con BSP.

### Bibliografía

Abbott, J.L. 1977. Importance of the organic phosphorus fraction in extracts of calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:81-85.

Appelhans, S.C., R.J. Melchiori, P.A. Barbagelata, L.E. Novelli. 2016. Assessing organic phosphorus contributions for predicting soybean response to fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:1688-1697.

Aramburu Merlos, F., J.P. Monzon, J.L. Mercau, M. Taboada, F.H. Andrade, A.J. Hall, E. Jobbagy, K.G. Cassman, P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crop Res.* 184:145-154.

Barbagelata, P.A. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. *Actas del Simposio "Fertilidad 2011: La nutrición de cultivos vinculada al sistema de producción"*. IPNI, Fertilizar A.C. Rosario, Santa Fe.

Barber, S.A. 1980. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. En: Khasawneh, F.E., E.C. Sample, E. J. Kamprath, (eds), *The role of phosphorus in agriculture*. ASA., Madison, WI. p. 591-615

Beegle, D. 2005. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. En: *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. Agronomy Monograph. 46:123-142.

Belinque H., N. Pucheu, N. Kerber, G. Rubio. 2015. Utilization of organic phosphorus sources by oilseed rape, sunflower, and soybean. *J Plant Nutr Soil Sc.* 178:339-344

Borges R., A.P. Mallarino. 2000. Grain Yield, Early Growth, and Nutrient Uptake of No-Till Soybean as Affected by Phosphorus and Potassium Placement. *Agron. J.* 92:380-388

Boschetti N.G., C.E. Quintero, R.A. Benavidez, L. Giuffre. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. *Ci. Suelo* 21:1-9.

Boschetti, N.G., C.E. Quintero, R.A. Benavidez. 1998. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Ríos, Argentina. *R. Bras. Ci. Solo* 22:95-99.

Bowman, R.A. 1989. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:362-366.

Bray, R.H., L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59:39-45.

Buah S.S.J., T. A. Polito, R. Killorn. 2000. No tillage soybean response to banded and broadcast and direct and residual fertilizer phosphorus and potassium applications. *Agron. J.* 92: 657-662.

Buchanan, M., L.D. King. 1993. Carbon and phosphorus losses from decomposing crop residues in no-till and conventional till agroecosystems. *Agron J.* 85:631-638

Bunemann, E.K., D.P. Heenan, P. Marschner, A.M. McNeill. 2006. Long-term effects of crop rotation, stubble management and tillage on soil phosphorus dynamics. *Aust. J. Soil Res.* 44:611-618.

Cambardella, C.A., E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783

Cate, R.B., L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data. *North Carolina Agric. Exp. Stn., Int. Soil Testing Series Tech. Bull. N° 1*

Cate, R.B., L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:658-659.

Caviglia, O., V.O. Sadras, F.H. Andrade. 2011. Yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agron. J.* 103:1081–1089.

Caviglia, O., V.O. Sadras, F.H. Andrade. 2013. Modelling long-term effects on cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *Field Crop Res.* 149:300-311.

Caviglia, O.P., F.H. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 3: 1–8.

Ciampitti, I.A., F.O. Garcia, L.I. Picone, G. Rubio. 2011a. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:131-142.

Ciampitti, I.A., F.O. Garcia, L.I. Picone, G. Rubio. 2011b. Soil carbon and phosphorus pools in field crop rotations in Pampean soil of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:616–625.

Condron, L.M., B.L. Turner, J. Cade-Menun. 2005. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. En: Sims, J.T., A.N. Sharpley, (eds), *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, p 87–121. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Condron, L.M., J.O. Moir, H. Tiessen, C.G. Stewart. 1990. Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1261–1266.

Cordell, D., J. Drangert, S. White. 2009. The story of phosphorus: global food security and food thought. *Global Environmental Change* 19: 292-305.

Correndo, A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con N y P en maíz y soja en región pampeana. Tesis de maestría en producción vegetal. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 170.

Dahnke, W.C., R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration and recommendation. En: R.L., Westerman, (ed), *Soil testing and plant analysis*. 3er ed. SSSA Book Ser. 3. SSSA, Madison, WI. p. 45-71.

Damon, P.M., B. Bowden, T. Rose, Z. Rengel. 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: a review. *Soil Biol. Biochem.* 74:127-137

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, C.W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Diaz Zorita, M. 1999. Efectos de seis años de labranzas en un Hapludol de noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ci. Suelo* 17:31-36

Dodd, R. J., A. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1118–1128.

Dodd, R.J., A.N. Sharpley. 2015. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. *Resour. Conserv. Recy.* 105:282-293.

Doré, T., D. Makowski, E. Malézieux, N. Munier-Jolain, M. Tchamitchian, P. Tittonell. 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur. J. Agron.* 34:197–210.

Fabrizzi, K.P., C.W. Rice, T.J.C. Amado, J. Fiorin, J., P. Barbagelata, R. Melchiori. 2009. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry* 92:129–143.

Fixen, P., J.H. Grove. 1990. Testing soils for phosphorus. En: Westerman, R.L. (ed) Soil testing and plant analysis. 3er ed. SSSA Book Ser. 3. SSSA, Madison, WI. p 141-180

Gee, G.W., J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. En: Klute, A. (ed), Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. ASA, Madison, WI, p. 383-411

Giuffré L., M. Zubillaga, O. Heredia, F. Missart. 1998. Mineralización de fósforo en molisoles pampeanos. *Ci. Suelo* 16:99-102.

Guggenberger, G., B.T. Christensen, G.H. Rubaek. 2000. Isolation and characterization of labile organic phosphorus pools in soils from the Askov long-term field experiments. *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 163:151-155.

Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? p 191-193. En: Simposio Fertilidad 2011. La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de producción. IPNI Fertilizar AC. Rosario, Santa Fe.

Ha, K.V., P. Marschner, E. K. Bünemann. 2008. Dynamics of C, N, P and microbial community composition in particulate soil organic matter during residue decomposition. *Plant Soil* 303:253-264.

Heckman, J. R., W. Jokela, T. Morris, D. B. Beegle, J. T. Sims, F. J. Coale, S. Herbert, T. Griffin, B. Hoskins, J. Jemison, W. M. Sullivan, D. Bhumbra, G. Estes, W. S. Reid. 2006. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the northeast USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 90:280-288.

Hedley, M.J., J.W.B. Stewart, B.S. Chahuan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.

Irizar, A., A. Andriulo, D. Consentino, C. Amendola. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ci. Suelo* 28:115-121.

Johnston, A.E., P.R. Poulton, R.P. White, A.J. Macdonald. 2016. Determining the long-term decline in plant-available soil phosphorus from short-term measured values. *Soil Use Manage.* 32:151-161.

Kuo, S. 1990. Phosphorus. En: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series n° 5.

Leikam, D., G. Randall, A. Mallarino. 2010. Are current soil test-based phosphorus and potassium fertilizer recommendations adequate?. *Crops and Soils* 43: 27-32.

Liquist, B.A., P.W. Singleton, K.G. Cassman. 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an ultisol. *Soil Sci.* 162:254-264.

MacDonald, G.K., E.M. Bennet, P.A. Potter, N. Ramankutty. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 108:3086-3091.

Mallarino, A, A.M. Atia. 2005. Correlation of a resin membrane soil phosphorus test with corn yield and routine soil test. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:266-272

Mallarino, A. 2003. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively coupled plasma emission spectroscopy determination methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1928-1934

Mallarino, A.P., J.E. Sawyer, S.K. Barnhart. 2013. A General Guide for Crop Nutrient and Limestone Recommendations in Iowa. Extension and Outreach Publications 82. [http://lib.dr.iastate.edu/extension\\_pubs/82](http://lib.dr.iastate.edu/extension_pubs/82).

- Maltese, N., R.J.M. Melchiori, G.A. Maddonni, J.M. Ferreyra, O.P. Caviglia. 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crop Res.* 231:40-50
- McDowell, R.W., Condon, L. M., Stewart, I. 2008. An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil. *Biol. Fertil. Soils.* 44:707–715.
- McLaren, T.I., C.N. Guppy, M.K. Tighe, P. Moody, M. Bell. 2014. Dilute Acid Extraction is a useful Indicator of the Supply of Slowly Available Phosphorus in Vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:139–146
- McLaughlin, M. J., T.M. McBeath, R. Smernik, S.P. Stacey, B. Ajiboye, C. Guppy. 2011. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications for fertilizer management and design: an Australian perspective. *Plant Soil* 349:69–87
- Mead, R., R.N. Curnow, A.M. Hasted. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology.* Chapman and Hall, London.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich III soil test extractant: A modification of Mehlich II extractant. *Commun.Soil Sci.Plan* 15:1409-1416.
- Melchiori, R. J. M., M. Ferrari, H. Fontanetto, S. M. Albarenque. 2008. Fertilidad fosfatada en soja en siembra directa: aporte de la fracción orgánica lábil. *Actas XXI Congreso Argentino de Ciencias del Suelo.* Potrero de Los Funes, San Luis.
- Murphy, J., H.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31-36.
- Novelli, L.E., O.P. Caviglia, G. Piñeiro. 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil Till. Res.*165:128-136.
- Olsen, S.R, C.V. Cole, F.S. Watanabe, L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circ.* 939.
- Pauletti, V., B. Monte Serrat, A.C. Vargas Motta, N. Favaretto, A. dos Anjos. 2010. Yield response to fertilization strategies in no-tillage soybean, corn and common bean crops. *Braz. Arch.Biol.Techn.* 53:563-574.
- Picone, L., I. Capozzi, E. Zamuner, H. Echeverría, H. Sainz Rozas. 2007. Transformaciones de fósforo en un molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Ci. Suelo* 25:99-107.
- Poulton, P.R., A.E. Johnston, R.P. White. 2013. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. *Soil Use Manage* 29:4–11.
- Puricelli, C. A: 1985. La agricultura rutinaria y la degradación del suelo en la Región Pampeana. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 4:33-48
- Quintero, C. E., N.G. Boschetti, R.A. Benavidez. 2003. Effect of Soil Buffer Capacity on Soil Test Phosphorus Interpretation and Fertilizer Requirement. *Commun.Soil Sci.Plan.* 34:1435–1450.
- R Core Team. 2013. *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Raghothama, K.G. 2005. Phosphorus and plant nutrition: an overview. En: Sims, J.T., A. Sharpley (eds), *Phosphorus: agriculture and the environment.* ASA., Madison, WI. p. 355-378.
- Recena, R., I. Diaz, A.M. García-López Diaz, A. Delgado. 2019. The determination of total phosphorus improves the accuracy of the bicarbonate extraction as an availability index. *Soil Use Manage.* 35:346–354.
- Recena, R., I. Diaz, M.C. del Campillo, J. Torrent, A. Delgado. 2016. Calculation of threshold Olsen P values for fertilizer response from soil properties. *Agron. Sustain. Dev.* 36:54

Sainz Rozas, H., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, M. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Actas del Simposio de Fertilidad 2013. Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. 62-72.

Salas, A.M., E.T. Elliott, D.G. Westfall, C.V. Cole, J. Six. 2003. The role of particulate organic matter in phosphorus cycling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:181-189.

Selles, F., C. A. Campbell, R.P. Zentner. 1995. Effect of Cropping and Fertilization on Plant and Soil Phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:140-144.

Sharpley, A. N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:905-911.

Sharpley, A.N. 1995. Soil phosphorus dynamics: Agronomic and environmental impacts. *Ecol. Eng.* 5:261-279.

Shaver, T.M., G.A. Peterson, L.A. Sherrod. 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma* 166:149-164.

Silva Rossi, M.M., A.A del C. Rollán y O.A. Bachmeier. 2013. Relación entre los indicadores de disponibilidad de fósforo y la respuesta de los cultivos de trigo, maíz y soja a la inoculación con *Penicillium bilaii*. *Agriscientia*, 30: 49-56.

Soil Survey Staff. 2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 51, Version 2.0. R. Burt, and Soil Survey Staff, editors, Washington, Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service

Steffens D., T. Leppin, N. Luschin-Ebengreuth, Z. Yang, S. Schubert. 2010. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 173:765-771.

Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. Ed. John Wiley & Sons. p 380.

Stewart, J., A. Sharpley. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. En: Follet, R., J. Stewart, C. Cole (eds), Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. SSSA Spec. Pub. No. 19. SSSA-ASA. Madison, Wisconsin, EE.UU.

Sucunza, F. A., F.H. Gutierrez Boem, F.O. Garcia, M.Boxler, G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: soil test trends, critical levels and balances. *Europ. J.Agron.* 96:87-95.

Suñer L., J. A. Galantini. 2013. Dinámica de las formas del p en suelos de la región sudoeste pampeana: estudio de la incubación con fertilizante fosfatado. *Cienc Suelo* 31: 33-44.

Suñer L., J. A. Galantini, R. Rosell. 2005. Cambios del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. *Informaciones Agronómicas* 25:5-8.

Suñer, L.G., J.A. Galantini, R.A. Rosell, M.D. Chamadoira. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104:105-111.

Tasi, H. 2009. Aplicación de cartas de suelo de Entre Ríos, Argentina, para evaluar índices de productividad específicos para los principales cultivos agrícolas. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña, España.

Thien, S.J., R. Myers. 1992. Determination of bioavailable phosphorus in soil. *Soil Sci Soc Am J.* 56:814-818

Tiessen H, J.O. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: Carter, M.R. (ed). Soil sampling and methods of analysis. *Can. Soc. Soil Sci., Lewis Publ.* p 293-306

Tiessen, H., J.W.B. Stewart, A. Oberson. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices. Assessing organic phosphorus. En: Havlin J.L., J.S. Jacobsen (eds), Soil testing: prospects for improving nutrient recommendations. Soil Sci. Soc. Am. Spec. 40, Madison, WI. p. 143-162.

Van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirements determination. En: Westerman, R.L. (ed), Soil testing and plant analysis. 3er ed. SSSA Book Ser. 3. SSSA, Madison, WI. pp. 73-126.

Varela, M.F., C.M. Scianca, M.A. Taboada, G. Rubio. 2014. Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina. Soil Till.Res. 143:59–66.

Walkley, A., I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37:29-38.

Wei, Z., J. Wu, X. Yan, G. Ni. 2016. Phosphorus and carbon status of a paddy soil under different fertilization regimes. J. Soils Sediments 16:1-8

Wingeyer, A.B., T.J.C. Amado, M. Pérez-Bidegain, G.A. Studdert, C. Perdomo Varela, F.O. García, D.L. Karlen. 2015. Soil quality impacts of current South America agricultural practices. Sustainability 7:2213–2242.

Wyngaard, N., A. Vidaurreta, H.E. Echeverria, L.I. Picone. 2013. Dynamics of phosphorus and carbon in the soil particulate fraction under different management practices. Soil Sci. Soc. Am. J. 77:1584–1590

Wyngaard, N., M. L. Cabrera, K.A. Jarosch, E.K. Bünemann. 2016. Phosphorus in the coarse soil fraction is related to soil organic phosphorus mineralization measured by isotopic dilution. Soil Biol. Biochem. 96:107-118.

Zhang, T.Q., A.F. MacKenzie. 1997. Changes of phosphorous fractions under continuous corn production in a temperate clay soil. Plant Soil 192:133–139

Ziadi, N, J. K. Whalen, A. J. Messiga, C. Morel. 2013. Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems. En D. L. Sparks (ed.) Advances in Agronomy 122:85-126