



FACULTAD DE AGRONOMÍA  
Universidad Nacional de La Pampa

## COMPARACIÓN DE LA BIODISPONIBILIDAD DE DOS FUENTES DE FÓSFORO EN SUELOS DE LA PLANICIE CON TOSCA

“Trabajo final de graduación presentado para obtener el título de Ingeniero Agrónomo”

**Autores:** Cardonatto, Kevin; Dell’Acqua, Cristian

**Directora:** Noellemeyer, Elke

Cátedra de Edafología y Manejo de suelos

**Co-directora:** Alvarez, María Lucila

Cátedra de Edafología y Manejo de suelos

**Evaluadores:**

Fernández, Romina

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Gaggioli, Carolina

Cátedra de Cereales y Oleaginosas

FACULTAD DE AGRONOMÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Santa Rosa (La Pampa)- Argentina 2020

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN.....                                       | 3  |
| ABSTRACT.....                                      | 3  |
| INTRODUCCIÓN.....                                  | 4  |
| OBJETIVO.....                                      | 6  |
| HIPÓTESIS.....                                     | 7  |
| MATERIALES Y MÉTODOS.....                          | 7  |
| Propiedades físico químicas del suelo.....         | 7  |
| Ensayos en macetas.....                            | 8  |
| RESULTADOS.....                                    | 10 |
| Materia seca aérea.....                            | 10 |
| Materia seca radicular.....                        | 13 |
| Relación tallo:raíz.....                           | 15 |
| Concentraciones de N y P en el tejido vegetal..... | 16 |
| DISCUSIÓN.....                                     | 17 |
| CONCLUSIONES.....                                  | 20 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                  | 21 |

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de una formulación de fertilizante fosforado líquido frente a una sólida bajo dos condiciones de humedad en suelos de Planicie con tosca (Provincia de La Pampa). Se realizaron ensayos en macetas con suelo de loma, media loma y bajo de un sitio en Planicie con tosca, utilizando trigo como cultivo. Se aplicaron dos fuentes fosforadas, superfosfato triple de calcio (STP, granulado) y polifosfato (PL, líquido) y un testigo (T); y dos condiciones de humedad: 80% de capacidad de campo (H1) y restricción de humedad (H2). En H1 no se observaron diferencias en materia seca (MS) entre SPT y PL y en la loma no se observó deficiencia de P en los tratamientos fertilizados, pero sí en el T. En H2, PL generó más MS que SPT en loma y media loma, y este no se diferenció del T. En la loma, T y SPT mostraron una marcada deficiencia de P, siendo significativamente menor en PL, indicando que la difusión de P desde el gránulo de SPT fue limitada. La utilización de PL mejoraría la eficiencia de uso del fertilizante respecto a fuentes granuladas en suelos calcáreos de ambientes semiáridos.

**Palabras clave:** ambientes semiáridos; superfosfato triple; polifosfato.

## ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the effect of a liquid phosphorous fertilizer formulation versus a solid one under two moisture conditions in Calcareous Plain soils (Province of La Pampa). Trials were carried out in pots with top-slope, mid-slope and foot-slope soil from a site in Calcareous Plain, using wheat as a crop. Two phosphorous sources were used, triple calcium superphosphate (STP, granulated) and polyphosphate (PL, liquid) and a control (T); and two moisture conditions: 80% field capacity (H1) and moisture restriction (H2). In H1, no differences were observed in dry matter (DM)

between SPT and PL and in top-slope, no P deficiency was found in the fertilized treatments, while plants in T were deficient. In H2, PL generated more DM than SPT in top-slope and mid-slope, and this did not differ from T. In top-slope, T and SPT showed a marked deficiency of P, being significantly lower in PL, which indicates that P-diffusion of the SPT granule was limited. Using PL would improve the efficiency of fertilizer use compared to granulated sources in calcareous soils of semi-arid environments.

**Key words:** semi-arid environments; triple superphosphate; polyphosphate.

## INTRODUCCIÓN

El fósforo (P), indispensable para la vida humana, animal y vegetal, juega un rol esencial en la seguridad alimentaria mundial. Su principal fuente es un recurso finito y no renovable y en varios trabajos se ha reportado una potencial crisis P para el futuro (Ashley et al., 2011). Las técnicas disponibles para una mejor eficiencia de uso aún no se han explotado completamente. La aplicación de P en forma apropiada y racional en los sistemas agropecuarios puede mejorar la eficiencia en su uso, a través de prácticas de manejo que aseguren la funcionalidad de los servicios ecosistémicos de los suelos, contribuyendo a una intensificación agrícola sostenible (Schröder et al., 2011).

El P es absorbido por las plantas en las formas iónicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$  y la solución del suelo sólo contiene una pequeña cantidad que puede estar disponible en cualquier momento. Los procesos generales de transformación de P son: meteorización y precipitación, mineralización e inmovilización, y adsorción y desorción. La meteorización, la mineralización y la desorción aumentan la disponibilidad para la planta, mientras que la inmovilización, la precipitación y la adsorción disminuyen su

disponibilidad. La mineralización e inmovilización son procesos importantes del ciclo del P en los suelos con alto contenido de materia orgánica, y el P orgánico puede ser una fuente importante para la nutrición vegetal. Los compuestos solubles del P presentan reactividad muy alta, solubilidad baja y movilidad reducida. La máxima disponibilidad de P ocurre a un pH del suelo entre 6,5 y 7,0. Especialmente en suelos ácidos, calcáreos y alcalinos la disponibilidad de P es limitante (Daroub et al., 2003).

La fertilidad fosforada y la disponibilidad de P para las plantas puede verse reflejada en respuestas en la calidad y el rendimiento del cultivo, mejorando la absorción de otros nutrientes, y contribuyendo a la tolerancia a sequía (Rubio et al., 2012; Suñer & Galantini, 2012). Sin embargo, los resultados de varios estudios indicarían que parte de los aportes de P-fertilizante se han acumulado en los suelos (Renneson et al., 2015; Wang et al., 2015), sugiriendo una baja eficiencia en el uso de este fertilizante y poca respuesta en términos de rendimiento por parte de los cultivos (Daroub et al., 2003). Además, con el tiempo, incluso las formas más lábiles de P maduran a formas menos disponibles, especialmente en suelos que contienen altas proporciones de Ca (Jalali & Ranjbar, 2010). En este tipo de suelos se ha observado que los aportes de P mediante los fertilizantes solubles granulares resultaron en muy bajas eficiencias de uso del elemento por parte de los cultivos (Khan et al., 2018; Lombi et al., 2006) y que las formulaciones líquidas presentan ventajas sobre las granuladas (Bertrand et al., 2006; Hettiarachchi et al., 2008; McBeath et al., 2007).

En la Región Semiárida Central (RSC) varios factores afectarían la disponibilidad de P y éstos podrían verse asociados a los atributos del paisaje. Particularmente, en la subregión de Planicie con tosca la disponibilidad de P está vinculado al contenido de  $\text{CaCO}_3$  pedogénico de los suelos que es un factor limitante para la disponibilidad de P

(Buschiazzo et al., 1998), al igual que el alto contenido de Ca intercambiable que determina una alta concentración de equilibrio del Ca en la solución del suelo.

La disponibilidad de P para las plantas depende de las cantidades de las diferentes formas de este en el suelo. La distribución de P en sus distintas fracciones está relacionada con otras propiedades químicas y con su desarrollo pedogenético (Cross & Schlesinger, 2001). El manejo del suelo y la fuente de fertilización utilizada inciden sobre la partición del P en sus distintas fracciones (Zamuner et al., 2012), y afectan su disponibilidad.

En suelos de Planicie con tosca la probabilidad de la transformación de los fosfatos aplicados como fertilizante a fosfatos de calcio con muy baja solubilidad, o su adsorción a las calcitas presentes en la masa de suelos calcáreos sería muy alta, sobre todo en suelos agrícolas con bajos contenidos de materia orgánica (Achat et al., 2016; Harrell & Wang, 2006). A su vez, los bajos contenidos de humedad en estos suelos también favorecerían la fijación de los fosfatos formando compuestos de muy baja biodisponibilidad (Du et al., 2013). En estas condiciones edáficas y climáticas, la aplicación de fertilizantes líquidos, como por ejemplo los polifosfatos, podría resultar en mejor disponibilidad y eficiencia de uso de P, dando como resultado una mayor producción de materia seca y rendimiento de los cultivos. Las formulaciones líquidas de fertilizante fosforado podrían presentar un mejor comportamiento que las formulaciones granulares, ya que las condiciones edáficas y climáticas son similares a las de los suelos calcáreos estudiados en el sur de Australia en los trabajos citados.

## **OBJETIVO**

El objetivo del presente estudio fue evaluar si la formulación de fertilizante fosforado líquido (polifosfato) presenta ventajas frente a la formulación sólida (superfosfato triple de calcio), en cuanto a la biodisponibilidad de P en suelos de Planicie con tosca.

## HIPÓTESIS

La aplicación de una formulación de fertilizante fosforado líquido (polifosfato) genera mayor disponibilidad de P que una formulación sólida (superfosfato triple de calcio) en suelos de Planicie con tosca.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo ensayos en macetas con suelo (3,5 kg) proveniente de los primeros 20 cm de ambientes bajo uso agrícola de loma, media loma y bajo de un sitio ubicado en la subregión Planicie con tosca de la Provincia de La Pampa (36° 45' 351''S; 64° 20' 445''O).

### Propiedades físico químicas del suelo

Los suelos fueron clasificados según (USDA-NRCS, 2014) como Paleustol petrocálcico en la loma y media loma y Haplustol típico en el bajo. Las propiedades físico químicas edáficas se encuentran detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades edáficas (contenido de carbono orgánico total, COT; P Olsen; capacidad de intercambio catiónico, CIC; concentraciones de Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, contenido de CaCO<sub>3</sub> y pH) de suelo de 0-20 cm de loma, media loma y bajo.

| Posición topográfica | Clase textural | P Olsen | COT | CIC | Ca | Mg | Na | K | Fe | Al | CaCO <sub>3</sub> | pH |
|----------------------|----------------|---------|-----|-----|----|----|----|---|----|----|-------------------|----|
|----------------------|----------------|---------|-----|-----|----|----|----|---|----|----|-------------------|----|

|            |    | mg kg <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> | cmol.kg <sup>-1</sup> |      |     |     |     | mg kg <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> |      |     |
|------------|----|---------------------|--------------------|-----------------------|------|-----|-----|-----|---------------------|--------------------|------|-----|
| Loma       | FA | 2,5<br>2,2          | 9,4                | 16,1                  | 22,2 | 0,6 | 0,1 | 1,4 | 875,4               | 840,0              | 9,3  | 7,6 |
| Media loma | FA | 2,8                 | 9,6                | 23,7                  | 16,8 | 1,2 | 0,1 | 1,8 | 747,8               | 885,1              | 10,5 | 7,8 |
| Bajo       | FA |                     | 10,7               | 19,4                  | 14,2 | 1,4 | 0,1 | 2,1 | 860,3               | 844,2              | 11,4 | 7,3 |

El contenido de CaCO<sub>3</sub> fue determinado por el método del calcímetro presurizado (Goh & Mermut, 2006), C orgánico total (COT) por digestión con dicromato de potasio y ácido sulfúrico y determinación colorimétrica (Skjemstad et al., 2003), cationes intercambiables y CIC por el método de acetato de amonio pH 7,0 y acetato de sodio pH 8,2, respectivamente, y determinación colorimétrica de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, y de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> por fotometría de llama (Hendershot y Lalonde, 2006) y P mediante la técnica de Olsen (Schoenau, 2006). La textura fue determinada por el método de la pipeta de Robinson (Gee & Bauder, 1986). Se determinó el porcentaje de agua retenido a capacidad de campo utilizando el modelo de Saxton y Rawls (2006), utilizando los datos de textura y materia orgánica. El pH se midió potenciométricamente en suspensiones de suelo:agua de 1:2,5. Los contenidos de Fe y Al se establecieron por extracción con oxalato de amonio ácido (pH=3) en oscuridad (Fe, Al) (Courchesne & Turmel, 2006), y posterior determinación por ICP (Inductively coupled plasma).

Como cultivo se utilizó trigo (*Triticum aestivum* L.) variedad ACA 315. Se determinó el poder germinativo del mismo para sembrar la cantidad de semillas necesarias, las cuales fueron previamente tratadas con curasemillas para prevenir posibles apariciones de hongos. Posterior a la emergencia se procedió a hacer un raleo para dejar 3 plántulas. Durante el ensayo se controló la aparición de malezas y enfermedades.

### Ensayos en macetas

La siembra se realizó el 26 de junio y previamente se humedeció el suelo a capacidad de campo y se aplicó una dosis de Nitrógeno (N) a razón de 30 kg ha<sup>-1</sup> por tonelada de

rendimiento de grano esperado. El fertilizante fosforado también fue aplicado previo a la siembra utilizando una dosis de suficiencia a razón de 5 kg ha<sup>-1</sup> de P por tonelada de rendimiento de grano. Se estimó un rinde de 4000 kg ha<sup>-1</sup>. A continuación, se describen los tratamientos realizados en este ensayo.

1. Testigo sin agregado de fertilizante fosforado. **(T)**
2. Fertilizado con formulación líquida de fertilizante fosforado (polifosfato, formulación comercial SolFOS, grado equivalente 11-37-0, densidad 1,41 g cm<sup>-3</sup>). Se aplicó superficialmente en forma de gotas. **(PL)**
3. Fertilizado con formulación sólida de fertilizante fosforado (Superfosfato triple de Calcio, grado equivalente 0-46-0, 14 % de Ca). Se ubicó el gránulo de fertilizante por debajo y al costado de la semilla a una distancia de 5 cm de ésta. **(SPT)**

Además, para cada uno se mantuvieron dos condiciones de humedad:

1. Humedad 1: condición “ideal” a 80 % capacidad de campo, manteniéndola constante en el tiempo. Se controló la humedad por peso de la maceta. **(H1)**
2. Humedad 2: periodos de secado y humedecimiento para simular las condiciones medias de humedad del suelo durante el periodo del cultivo en la región semiárida pampeana, teniendo en cuenta las frecuencias de precipitaciones. **(H2)**
- 3.

Los tratamientos son resumidos en la Figura 1. Se realizaron 4 repeticiones de cada tratamiento, dando como resultado un total de 72 macetas.

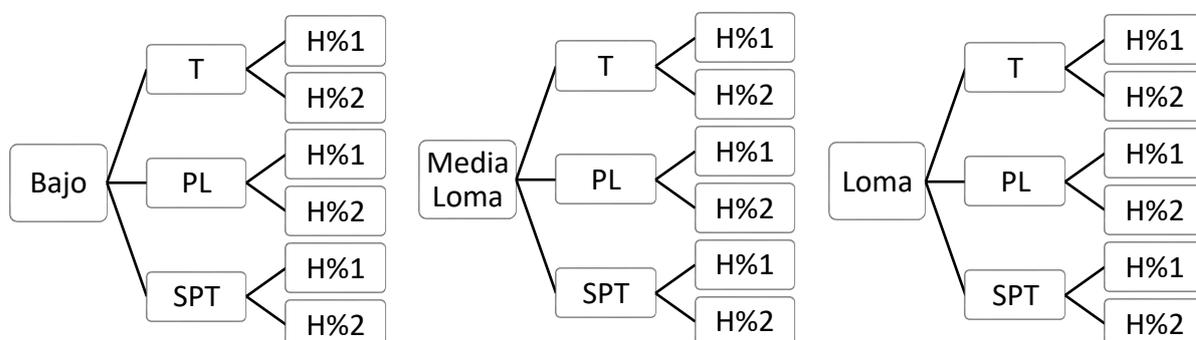


Figura 1. Esquema de los tratamientos realizados.

Los cortes se realizaron el 10 de octubre y el estado fenológico varió entre Z3 y Z4 principalmente de acuerdo al régimen de humedad (H1 y H2, respectivamente). Se determinó peso seco de raíces por lavado y tamizado del suelo de cada maceta, de biomasa aérea por corte al ras del suelo y se midió altura de las plantas. Además, sobre las muestras de materia seca aérea de los ensayos realizados en el suelo de la loma se determinó el contenido de P y N total por espectrometría ICP (Inductively Coupled Plasma).

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2013). Se analizó el cumplimiento de los supuestos y se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) con la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

## **RESULTADOS**

### **Materia seca aérea**

Considerando el promedio de loma, media loma y bajo, con una adecuada provisión de agua (H1) se encontró respuesta en MS a la fertilización con ambas fuentes (PL y SPT) respecto al T, mientras que la altura de las plantas no se diferenció en ninguno de los casos (Tabla 2). Sin embargo, con restricción de humedad (H2) sólo se halló una respuesta en MS al fertilizar con PL, mientras que no se encontraron diferencias entre SPT y T, sucediendo lo mismo con la altura de las plantas. En todos los casos, tanto la producción de MS como la altura de las plantas se vieron afectada por la restricción de humedad (H2).

Tabla 2. Materia seca (MS) aérea (g) y altura (cm) de las plantas (promedio de loma, media loma y bajo) en el T (testigo), SPT (superfosfato triple) y PL (polifosfato) y bajo las dos condiciones de humedad (H1; H2).

| Tratamiento | MS aérea (g) |         | Altura (cm) |          |
|-------------|--------------|---------|-------------|----------|
|             | H1           | H2      | H1          | H2       |
| T           | 2,88 Ab      | 0,24 Aa | 43,53 Ab    | 18,31 Aa |
| SPT         | 4,03 Bb      | 0,25 Aa | 46,60 Ab    | 17,98 Aa |
| PL          | 3,77 Bb      | 0,62 Ba | 45,94 Ab    | 20,51 Ba |

*Letras mayúsculas diferencias entre filas, minúsculas entre columnas  $p < 0,05$ .*

Se encontró interacción significativa entre tratamiento y posición topográfica del suelo ( $p < 0,01$ ). En los tratamientos sin limitación de humedad (H1), en el caso de los testigos se encontraron diferencias entre las tres posiciones, incrementándose la producción de MS desde la loma (1,83 g) hacia el bajo (3,80 g), mientras que en los fertilizados con SPT la loma presentó la menor producción de MS (2,93 g) y entre la media loma (4,73 g) y el bajo (4,45 g) no se hallaron diferencias significativas. En los tratamientos fertilizados con PL se observaron diferencias entre las tres posiciones, encontrándose una mayor producción de MS en la media loma (5,13 g), seguido por el bajo (3,73 g), y al igual que en los casos anteriores la menor producción de MS se dio en el suelo de la loma (2,45 g) (Figura 2). En las plantas de la loma y de la media loma los tratamientos fertilizados presentaron mayor producción de MS que los testigos, sin diferenciarse significativamente entre ellos. En el suelo del bajo no se encontró una respuesta a la fertilización y tampoco se hallaron diferencias entre fuentes fosforadas.

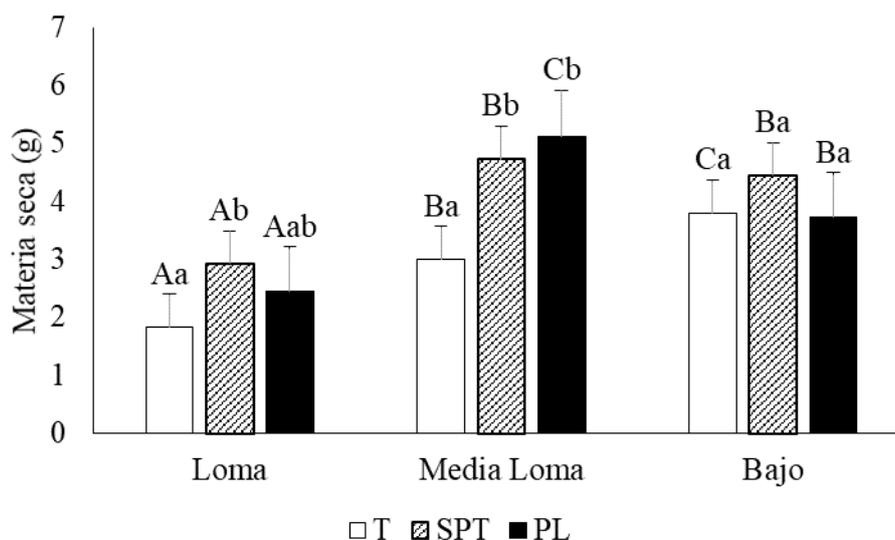


Figura 2. Materia seca aérea (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación de humedad (H1) en suelo de loma, media loma y bajo.

*Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas, letras minúsculas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).*

En condiciones de humedad limitantes (H2) en el testigo se observaron diferencias significativas entre las tres posiciones topográficas, presentando las plantas del suelo del bajo la mayor producción de MS (0,40 g) y las de la loma la menor producción (0,13 g). La fertilización con SPT no produjo diferencias entre la loma (0,15 g) y la media loma (0,15 g), pero al igual que en el testigo el bajo presentó mayor MS (0,45 g). Al fertilizar con PL no se hallaron diferencias significativas entre loma (0,48 g), media loma (0,68 g) y bajo (0,70 g). Tanto en las plantas de la loma como de la media loma y bajo esta condición de humedad, sólo se halló una respuesta a la fertilización cuando se aplicó PL. Sin embargo, en el suelo del bajo las diferencias entre testigo, SPT y PL no llegan a ser significativas (Figura 3).

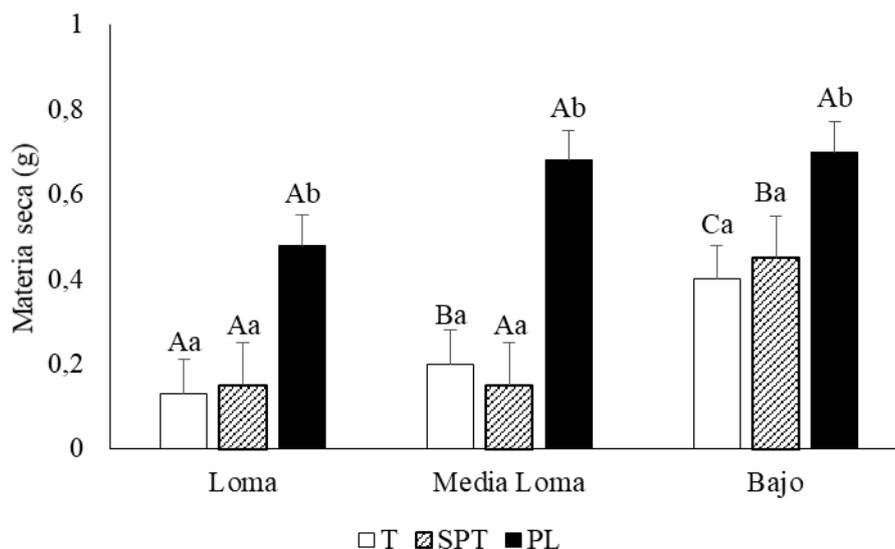


Figura 3. Materia seca aérea (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento con limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo.

*Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas, letras minúsculas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).*

### Materia seca radicular

En los tratamientos sin limitación de humedad (H1) la materia seca radicular de los testigos no presentó diferencias significativas entre las tres posiciones (loma 3,20 g; media loma 5,20; bajo 3,17 g), mientras que en el caso de las macetas fertilizadas con SPT las de la loma presentaron menor MS radicular (3,35 g) que la media loma (6,88 g) y el bajo (5,63 g). En cuanto al PL se halló un valor mayor de MS radicular en las macetas de la media loma (6,07 g), no encontrándose diferencias significativas entre la loma (3,33 g) y el bajo (3,85 g). En las plantas del suelo de la loma no se encontraron diferencias en MS radicular entre los testigos y los fertilizados y tampoco entre estos últimos, en la media loma se observó respuesta con los dos fertilizantes respecto al testigo y en el bajo hubo mayor MS radicular en el tratamiento fertilizado con SPT

respecto al testigo y el fertilizado con PL no presentó diferencias significativas con ninguno de los dos (Figura 4).

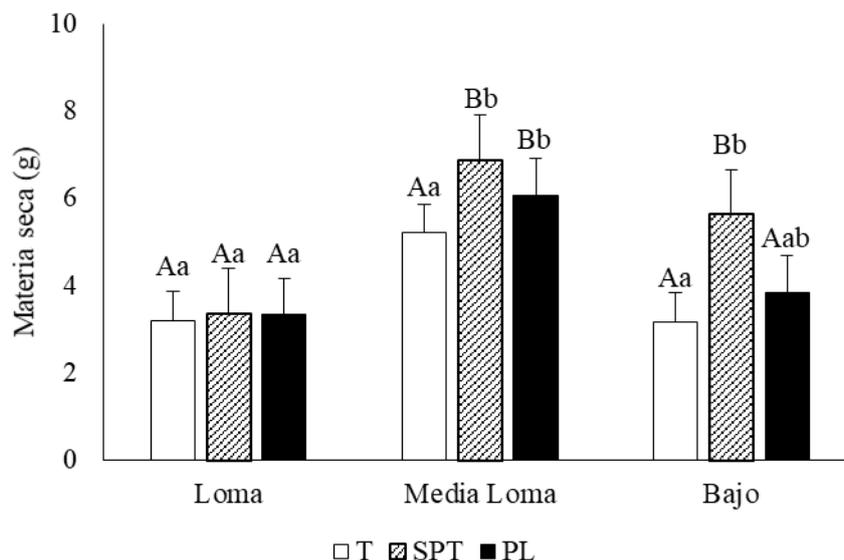


Figura 4. Materia seca radicular (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación de humedad (H1) en suelo de loma, media loma y bajo.

*Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas, letras minúsculas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).*

En condiciones de humedad limitante (H2) no hubo diferencias significativas en MS radicular en los testigos entre loma (2,53 g), media loma (2,95 g) y bajo (2,40 g). En los tratamientos fertilizados con SPT las plantas de la loma (0,98 g) presentaron una disminución significativa en la MS radicular, respecto a la media loma (3,10 g) y el bajo (2,50 g). Al fertilizar con PL no se hallaron diferencias entre loma (2,17 g) y bajo (2,55 g) y la media loma presentó un valor de MS radicular más alto (4,40 g). Las plantas de la loma presentaron el menor valor de MS radicular cuando se fertilizó con SPT, mientras que en la media loma y el bajo no se hallaron diferencias significativas entre el testigo, SPT y PL (Figura 5).

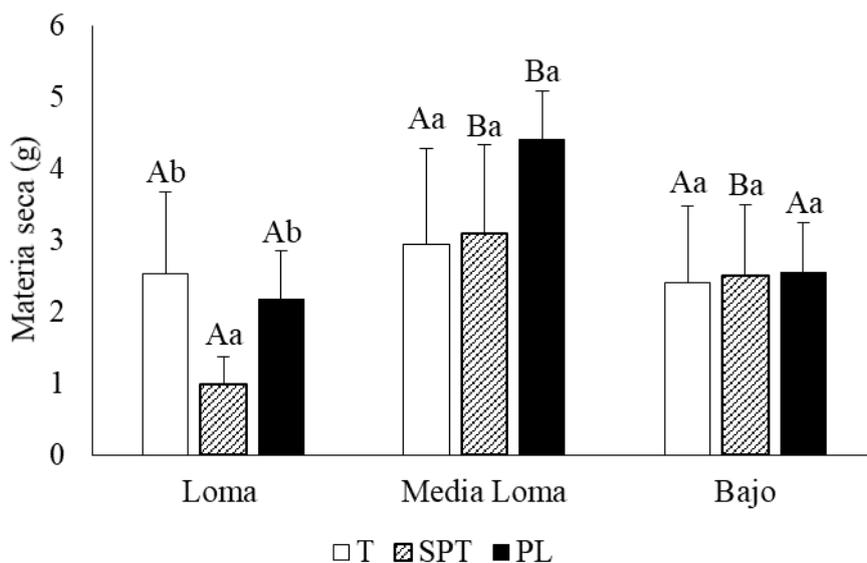


Figura 5. Materia seca radicular (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento con limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo.

*Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas, letras minúsculas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).*

### **Relación tallo:raíz**

En los tratamientos H1, en el testigo las plantas del suelo del bajo presentaron mayor relación tallo:raíz que en la media loma y la loma, mientras que en el caso de la fertilización con SPT no hubo diferencias significativas entre las tres posiciones. En cuanto al PL las plantas del suelo del bajo mostraron mayor relación tallo:raíz que en la loma, sin diferenciarse de la media loma. No se hallaron diferencias significativas entre testigo, SPT y PL en ninguna de las tres posiciones topográficas.

En el caso de H2, al igual que en H1, dentro de los testigos las plantas del suelo del bajo fueron las que mayor relación tallo:raíz presentaron, mientras que en los fertilizados con SPT tanto la loma como el bajo tuvieron mayor relación tallo:raíz que la media loma, sin diferenciarse entre sí. Los tratamientos fertilizados con PL no presentaron diferencias significativas entre las tres posiciones. Dentro de los tratamientos del suelo

de loma, el testigo fue el que tuvo menor relación tallo:raíz, seguido por el SPT y el PL, el cual fue superior. En la media loma el PL presentó mayor relación tallo: raíz que el SPT, pero ninguno de los dos tuvo diferencias significativas con el testigo. En los tratamientos del bajo no se hallaron diferencias entre T, SPT y PL, similar a lo ocurrido en el caso de H1 (Tabla 3).

Tabla 3. Relación tallo:raíz en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) en suelo de loma, media loma y bajo, con y sin limitación de humedad (H1 y H2, respectivamente).

| Posición   | Relación tallo:raíz |         |          |           |         |         |
|------------|---------------------|---------|----------|-----------|---------|---------|
|            | Humedad 1           |         |          | Humedad 2 |         |         |
|            | T                   | SPT     | PL       | T         | SPT     | PL      |
| Loma       | 0,69 Aa             | 0,90 Aa | 0,75 Aa  | 0,07 Aa   | 0,16 Bb | 0,23 Ac |
| Media Loma | 0,63 Aa             | 0,69 Aa | 0,83 ABa | 0,08 Aab  | 0,05 Aa | 0,19 Ab |
| Bajo       | 1,27 Ba             | 0,88 Aa | 1,03 Ba  | 0,30 Ba   | 0,19 Ba | 0,26 Aa |

*Letras mayúsculas señalan diferencias entre filas, y letras minúsculas entre columnas  $p < 0,05$ .*

### **Concentraciones de N y P en el tejido vegetal**

La concentración de N y P en las plantas de H1 fue mayor en el tratamiento fertilizado con SPT, respecto a T y PL, los cuales no mostraron diferencias. Sin embargo, en el caso de H2 el T presentó las concentraciones más altas de N y P, diferenciándose de los fertilizados, dentro de los cuales el PL mostró las concentraciones más bajas de estos elementos. En H1 el T fue el que mayor relación N:P presentó, mientras que no se hallaron diferencias significativas entre fertilizantes. Sin embargo, en H2 T y SPT no se diferenciaron entre sí y PL presentó el valor más bajo de N:P. Por otro lado, tanto en T

como SPT los tratamientos con limitación de humedad (H2) tuvieron mayor relación N:P que los tratamientos sin limitación (H1), mientras que en el caso del PL las diferencias entre los dos niveles de humedad no fueron significativas (Tabla 4).

Tabla 4. Concentración de N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) y P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) y relación N:P en el material vegetal aéreo bajo dos condiciones de humedad (sin estrés hídrico, H1 y con estrés hídrico, H2) en tratamientos testigo (T), superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido PL en suelo de loma.

| Tratamiento | N ( $\text{g kg}^{-1}$ ) |        | P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) |          | N:P     |         |
|-------------|--------------------------|--------|---------------------------|----------|---------|---------|
|             | H1                       | H2     | H1                        | H2       | H1      | H2      |
| T           | 16,9 A                   | 31,4 C | 885,0 A                   | 1308,5 C | 19,1 Ba | 24,0 Bb |
| SPT         | 19,7 B                   | 28,6 B | 1193,3 B                  | 1201,8 B | 16,5 Aa | 23,8 Bb |
| PL          | 15,1 A                   | 17,5 A | 908,0 A                   | 937,5 A  | 16,6 Aa | 18,7 Aa |

*Letras mayúsculas señalan diferencias entre filas, y letras minúsculas entre columnas  $p < 0,05$ .*

## DISCUSIÓN

Las plantas de los tratamientos testigo y fertilizado con SPT del suelo de loma, en condiciones limitantes de humedad, fueron las que menor relación tallo:raíz presentaron, coincidiendo con las deficiencias de P más marcadas, de acuerdo a los valores de N:P. La baja disponibilidad de P en el tratamiento fertilizado con SPT también resultó en menor biomasa acumulada en este tratamiento comparado con el de aplicación de P líquido. Bajo deficiencia de P, el crecimiento radicular puede ser menos inhibido que el crecimiento del tallo, llevando a una disminución en la relación tallo:raíz (Lamber et al., 2006; Steingrobe et al., 2001). Esta disminución es debida a un aumento en la partición de carbohidratos hacia las raíces (Hawkesford et al., 2012). La relación N:P puede ser usada como diagnóstico para detectar deficiencias de N y P. Relaciones

N:P menores a 14 sugieren deficiencias de N mientras que valores por encima de 16 muestran deficiencia de P (Prado & Silva, 2017). La relación N:P hallada en el tejido vegetal (plantas en el suelo de loma) en los tratamientos fertilizados y sin restricción de humedad fue cercana al límite por encima del cual habría una deficiencia de P (16,51 en SPT y 16,63 en PL), además el testigo también superó los 16 marcando una deficiencia de P. Otros autores, sin embargo, mencionan una relación N:P ideal entre 10 y 20 (Koerselman & Meuleman, 1996). Esto se vio reflejado en la respuesta en MS aérea cuando se aplicó fertilizante, independientemente de la fuente utilizada, indicando que en condiciones de humedad edáficas adecuadas la difusión de P desde el gránulo de SPT no estaría afectada.

En el ensayo de MS aérea con restricción de humedad el PL presentó mayor crecimiento en la loma y media loma, lo cual se debe a la ventaja que presenta el PL con respecto al SPT en cuanto a la difusión del elemento (Lombi et al., 2004b). Bajas tasas de aplicación o de disponibilidad de P en condiciones de estrés hídrico generan una gran reducción en el crecimiento de la planta y por ende en el rendimiento del cultivo, mientras que un adecuado suministro de P compensa el efecto del estrés hídrico (Jones et al., 2005; Mumtaz et al., 2014).

La mejora en la absorción de P por la planta al aplicar la fuente líquida respecto al gránulo de SPT bajo condiciones de humedad restrictivas estaría relacionada con las condiciones de difusión (Menezes-Blackburn et al., 2018). Cuando el suelo presenta buenas condiciones de humedad y la tasa de difusión del P no se ve limitada por este factor, el PL no presentó una ventaja sobre el SPT. Sin embargo, cuando el cultivo está sujeto a condiciones de sequía la difusión se ve limitada y esto además contribuye a que la mayor parte del P quede concentrada alrededor del gránulo de fertilizante. De esta manera se favorece la precipitación de fosfatos de Ca que podrían ir convirtiéndose en

formas más estables con el tiempo (Perassi & Borgnino, 2014). Esta situación puede verse además propiciada en suelos como los del ambiente de loma y media loma en Planicie con tosca, donde puede haber una mayor concentración de Ca y  $\text{CaCO}_3$ . En suelos con mayor contenido de materia orgánica, tal como el del bajo, este efecto podría verse atenuado debido al efecto supresor de los compuestos húmicos sobre la precipitación de P-Ca y la adsorción de P sobre calcita (Sindelar et al., 2015).

La aplicación de PL presentó ventajas sobre el SPT, similar a lo hallado por otros autores que compararon fuentes fosforadas líquidas y sólidas en suelos calcáreos. Varios estudios han mostrado que la presencia de polifosfatos inhibe la precipitación de ortofosfatos y sobre todo los fosfatos de calcio en suelos alcalinos calcáreos (Bertrand et al., 2006). La aplicación de SPT resultó en menor absorción de P por parte de las plantas, lo cual podría estar relacionado con menor disolución y difusión del P de esta fuente en el suelo calcáreo. Las diferencias entre suelos se deben a procesos de fijación y no tanto a la incompleta disolución del gránulo (Lombi et al., 2004b). Holloway et al. (2001) postularon que es más probable que el proceso de precipitación de P con calcio ocurra alrededor del gránulo de fertilizante que al aplicar fertilizante fluido, donde la concentración de P en cualquier punto de la banda de aplicación es menor. Esto está relacionado con que hay un flujo de agua hacia los gránulos de fosfato, los cuales son altamente higroscópicos, y este flujo iría en la dirección opuesta a la difusión de P desde el gránulo (Hettiarahchci et al., 2006). En cambio, cuando se aplican fertilizantes líquidos, el agua de la solución fertilizante puede disminuir el flujo osmótico del agua del suelo en dirección opuesta a la difusión del P (Khatiwada et al., 2014). También se ha encontrado un incremento en Ca en el gránulo del fertilizante, indicando que el Ca puede migrar hacia el mismo y producir así la precipitación de P-Ca alrededor del

gránulo, disminuyendo aún más la posibilidad de disolución del mismo (Lombi et al., 2004a).

Por otra parte, la escasez de humedad en el suelo, situación frecuente en la región semiárida, puede afectar la difusión de P desde el fertilizante hacia las raíces, sobre todo en el caso del gránulo de SPT. De esta manera se observó una marcada deficiencia de P en los tratamientos testigo y fertilizado con SPT en el tratamiento con limitaciones en la humedad (H2) ya que estos casos superaron la relación N:P por encima del cual se sugiere deficiencia de P (24,01 en el testigo y 23,81 en SPT), indicando que fertilizar con SPT con contenidos limitantes de humedad no incrementaría el P absorbido por el cultivo. En el caso del tratamiento fertilizado con PL la relación N:P fue significativamente menor que en los otros tratamientos y no se diferenció del tratamiento fertilizado con la misma fuente, pero sin restricción de humedad, indicando que la utilización de esta fuente podría atenuar el efecto de la falta de humedad en el suelo. La deficiencia de P se vio traducida en menor producción de MS aérea ya que un suministro inadecuado de P genera una disminución de la expansión de hojas y del número de hojas porque se reduce la tasa de producción y división celular (Hawkesford et al., 2012). Por otro lado, la fertilización con PL podría generar una mayor homogeneidad en el crecimiento de las plantas dentro de un lote, ya que como se observó en este tratamiento no se hallaron diferencias entre los ensayos con suelos de los tres ambientes.

## **CONCLUSIONES**

Los resultados de este estudio mostraron que frente a restricciones de humedad el fósforo líquido se comporta mejor que el fosforo granulado, debido a que resulto mejor la absorción de esta fuente (PL). Por este motivo se puede concluir que la utilización de

esta fuente mejoraría la eficiencia de uso del fertilizante respecto a aplicaciones de fuentes granuladas en ambientes semiáridos y en suelos calcáreos con bajos niveles de materia orgánica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Achat, D.L., Pousse, N., Nicolas, M., Brédoire, F., Augusto, L., 2016. Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. *Biogeochemistry* 127, 255–272. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0178-0>

Ashley, K., Cordell, D., Mavinic, D., 2011. A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere* 84, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.001>

Bertrand, I., McLaughlin, M.J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., McBeath, T., 2006. Changes in P Bioavailability Induced by the Application of Liquid and Powder Sources of P, N and Zn Fertilizers in Alkaline Soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 74, 27–40. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-4404-3>

Buschiazzo, D.E., Hevia, G.G., Hepper, E.N., Stahr, K., Papenfuß, K.H., 1998. Contents and weathering state of volcanic ashes and their effects on phosphate sorption in soils of the semiarid pampa of Argentina. *Arid Soil Res. Rehabil.* 12, 15–27. <https://doi.org/10.1080/15324989809381494>

Courchesne, F., Turmel, M., 2006. Chapter 26: Extractable Al, Fe, Mn, and Si, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.

Cross, A.F., Schlesinger, W.H., 2001. Biological and geochemical controls on

phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry* 52, 155–172.

<https://doi.org/10.1023/A:1006437504494>

Daroub, S.H., Gerakis, A., Ritchie, J.T., Friesen, D.K., Ryan, J., 2003. Development of a soil-plant phosphorus simulation model for calcareous and weathered tropical soils. *Agric. Syst.* 76, 1157–1181. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00082-3)

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C., 2013. Infostat - Software estadístico. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [WWW Document]. Univ. Nac. Córdoba, Argentina.

Du, Z.Y., Wang, Q.H., Liu, F.C., Ma, H.L., Ma, B.Y., Malhi, S.S., 2013. Movement of Phosphorus in a Calcareous Soil as Affected by Humic Acid. *Pedosphere* 23, 229–235.

Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size Analysis, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 383–411.

<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>

Goh, T.B., Mermut, A.R., 2006. Chapter 20 Carbonates, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.

Harrell, D.L., Wang, J.J., 2006. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. *Soil Sci.* 171.

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I., White, P., 2012. *Functions of Macronutrients, Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>

- Hendershot, W.H., Lalonde, H., 2006. Chapter 18 Ion Exchange and Exchangeable Cations, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. CRC Press, Inc.
- Hettiarachchi, G.M., McLaughlin, M.J., Scheckel, K.G., Chittleborough, D.J., Newville, M., Sutton, S., Lombi, E., 2008. Evidence for Different Reaction Pathways for Liquid and Granular Micronutrients in a Calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 98. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0058>
- Hettiarachchi, G.M., Lombi, E., McLaughlin, M.J., Chittleborough, D., Self, P., 2006. Density Changes around Phosphorus Granules and Fluid Bands in a Calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 960. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0296>
- Holloway, R., Bertrand, I., Frischke, A., Brace, D., 2001. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant Soil* 209–219.
- Jalali, M., Ranjbar, F., 2010. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma* 155, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.030>
- Jones, D.L., Healey, J.R., Willett, V.B., Farrar, J.F., Hodge, A., 2005. Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? *Soil Biol. Biochem.* 37, 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.008>
- Khan, A., Lu, G., Ayaz, M., Zhang, H., Wang, R., Lv, F., Yang, X., Sun, B., Zhang, S., 2018. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.006>

- Khatiwada, R., Hettiarachchi, G.M., Mengel, D.B., Fei, M., 2014. Placement and Source Effects of Phosphate Fertilizers on Phosphorus Availability and Reaction Products in Two Reduced-Till Soils: A Greenhouse Study. *Soil Sci.* 179.
- Koerselman, W., Meuleman, A., 1996. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J. Appl. Ecol.* (United Kingdom).
- Lamber, H., Shane, M.W., Cramer, M.D., Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., 2006. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus : Matching Morphological and Physiological Traits 693–713.  
<https://doi.org/10.1093/aob/mcl114>
- Lombi, E., Johnston, C., Armstrong, R., Holloway, R., 2004a. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc.* 682–689.
- Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D., Holloway, R.E., 2004b. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant Soil* 269, 25–34. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0558-z>
- Lombi, E., Scheckel, K.G., Armstrong, R.D., Forrester, S., Cutler, J.N., Paterson, D., 2006. Speciation and Distribution of Phosphorus in a Fertilized Soil: A Synchrotron-Based Investigation 2038–2048.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0051>
- McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Armstrong, R.D., Bell, M., Bolland, M.D. a., Conyers, M.K., Holloway, R.E., Mason, S.D., 2007. Predicting the response of wheat ( *Triticum aestivum* L.) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils. *Aust. J. Soil Res.* 45, 448. <https://doi.org/10.1071/SR07044>

- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T.S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D.S., Wearing, C., Zhang, H., Haygarth, P.M., 2018. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant Soil* 427, 5–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>
- Mumtaz, M., Jamil, M., Ahmad, M., 2014. Effect of Different Phosphorus Levels on Growth and Yield of Wheat under Water Stress Conditions. *J. Environ. Earth Sci.* 4, 23–30.
- Perassi, I., Borgnino, L., 2014. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO<sub>3</sub>–montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid. *Geoderma* 232–234, 600–608. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2014.06.017>
- Prado, R.D.M., Pereira da Silva, G., 2007. Ecological Response to Global Change : Changes in C : N : P Stoichiometry in Environmental Adaptations of Plants. *Plant Ecol. - Tradit. Approaches to Recent Trends* 147–163.
- Renneson, M., Vandenberghe, C., Dufey, J., Marcoen, J.M., Bock, L., Colinet, G., 2015. Degree of phosphorus saturation in agricultural loamy soils with a near-neutral pH. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 33–41. <https://doi.org/10.1111/ejss.12207>
- Rubio, G., Faggioli, V., Scheiner, J.D., Gutiérrez-Boem, F.H., 2012. Rhizosphere phosphorus depletion by three crops differing in their phosphorus critical levels. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 810–871. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200307>
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

- Schoenau, J.J., 2006. Chapter 8 Sodium Bicarbonate-Extractable Phosphorus.
- Schröder, J.J., Smit, a. L., Cordell, D., Rosemarin, a., 2011. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. *Chemosphere* 84, 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.065>
- Sindelar, H.R., Brown, M.T., Boyer, T.H., 2015. Effects of natural organic matter on calcium and phosphorus co-precipitation. *Chemosphere* 138, 218–224. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2015.05.008>
- Skjemstad, J.O., Baldock, J.A. a, Sjemstad, J.O., Baldock, J.A. a, 2003. Chapter 21 Total and Organic Carbon, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Steingrobe, B., Schmid, H., Claassen, N., 2001. Root production and root mortality of winter barley and its implication with regard to Phosphate acquisition. *Plant Soil* 237, 239–248. <https://doi.org/10.1023/A:1013345718414>
- Suñer, L.G., Galantini, J.A., 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la Región Sudoeste pampeana. *Cienc. del suelo* 30, 57–66.
- USDA-NRCS, 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos.
- Wang, B., Li, J., Ren, Y., Xin, J., Hao, X., Ma, Y., Ma, X., 2015. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat–maize rotation production areas of China. *F. Crop. Res.* 178, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.007>
- Zamuner, E., Picone, L., Diez, a, 2012. Effect of long-term phosphorus fertilization on soil phosphorus fractions. *Span. J. Soil Sci.* 2, 50–61. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2012.V2.N2.03>