

SUMAR FÓSFORO, HACE LA DIFERENCIA

FÓSFORO EN EL SUELO



MANUAL TÉCNICO FICHAS 13 A 30



FERTILIZAR

ASOCIACION CIVIL

FÓSFORO EN EL SUELO

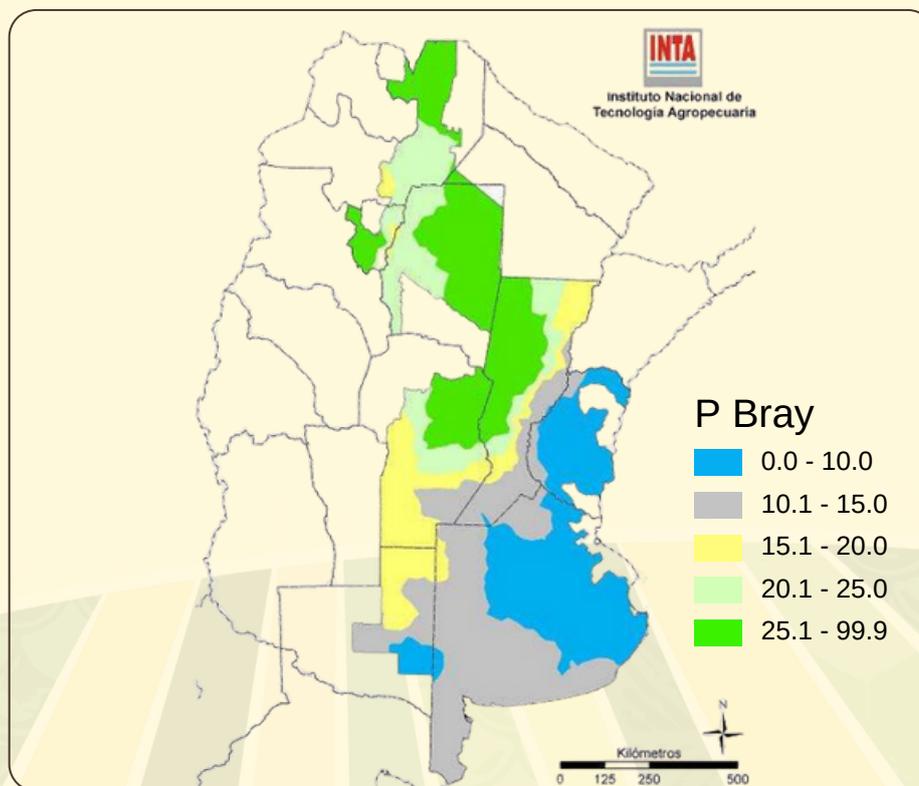
ÍNDICE

#13 - <u>LA CANTIDAD DE FÓSFORO EN LOS SUELOS ES VARIABLE</u>	1
#14 - <u>FORMAS DEL FÓSFORO EN LA NATURALEZA</u>	2
#15 - <u>EN EL SUELO COEXISTEN FORMAS CON DIFERENTE ESTABILIDAD QUÍMICA</u>	3
#16 - <u>EL FÓSFORO TOTAL DE LOS SUELOS</u>	4
#17 - <u>EL FÓSFORO EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO</u>	5
#18 - <u>LA ACIDEZ DEL SUELO MODIFICA LA SOLUBILIDAD DEL FÓSFORO</u>	6
#19 - <u>LAS FORMAS DE FÓSFORO SOLUBLES NUTREN A LAS PLANTAS</u>	7
#20 - <u>FORMAS INORGÁNICAS DEL FÓSFORO EN LOS SUELOS</u>	8
#21 - <u>FORMAS ORGÁNICAS DE FÓSFORO EN LOS SUELOS</u>	9
#22 - <u>EL FÓSFORO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS SE TRANSFORMA EN COMPUESTOS INORGÁNICOS</u>	10
#23 - <u>LOS MICROORGANISMOS DE LOS SUELOS MEJORAN LA NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS CON FÓSFORO</u>	11
#24 - <u>¿CÓMO SABER SI LA CANTIDAD DE "P" QUE TIENE UN SUELO ES SUFICIENTE?</u>	12
#25 - <u>APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DEL FÓSFORO DE LOS SUELOS</u>	13
#26 - <u>LOS NIVELES DE FÓSFORO EXTRACTABLE NO SON UNIFORMES</u>	14
#27 - <u>LOS NIVELES DE FÓSFORO EXTRACTABLE VARÍAN ENTRE REGIONES</u>	15
#28 - <u>LOS NIVELES DE FÓSFORO EXTRACTABLE VARÍAN CON EL TIEMPO</u>	16
#29 - <u>EL FÓSFORO EXTRACTABLE VARÍA EN PROFUNDIDAD</u>	17
#30 - <u>LA DISTRIBUCIÓN DEL FÓSFORO EXTRACTABLE EN LOS LOTES NO ES UNIFORME</u>	18

La cantidad de fósforo de un suelo depende de distintos factores:

- De la cantidad de P que había en la roca parental.
- El manejo y uso del ambiente por parte del hombre.
- Las condiciones climáticas son una variable que influye, pero no tienen tanta incidencia al ser poco soluble
- El pH y la textura del suelo tienen influencia sobre la disponibilidad más que el contenido de P el suelo

Los suelos tienen diferentes cantidades de fósforo, en algunos casos es alta, pero pueden ser muy bajas también en algunas condiciones.

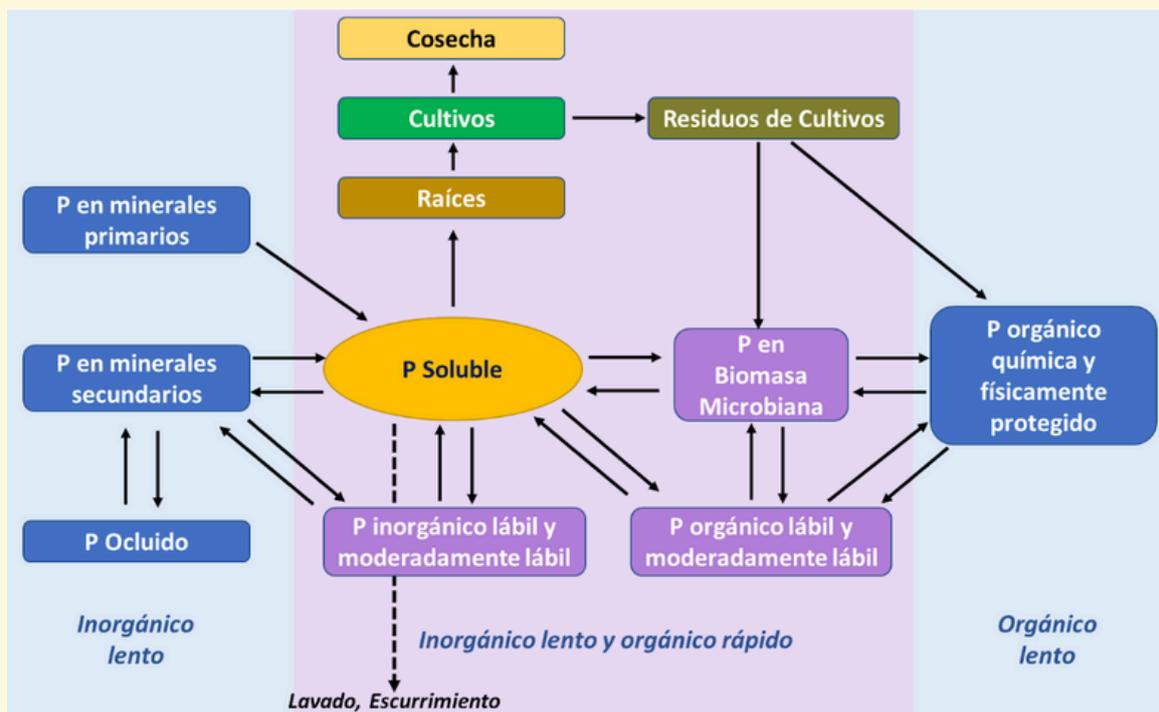


La concentración de fósforo total en el suelo depende básicamente de cuanto fósforo tenía el material o roca parental que dio origen en el suelo, entendiendo cuanto de un mineral en particular (“apatita”) se encontraba en este material parental. El manejo y uso que el hombre hace del suelo puede aumentar, o más habitualmente disminuir, los contenidos de fósforo en los suelos. Entre los usos posibles, el manejo agrícola suele modificar las cantidades de fósforo de los suelos. Al no ser un elemento demasiado soluble, las condiciones climáticas, particularmente las precipitaciones, no son un factor demasiado determinante en las cantidades de fósforo total de los suelos. Algunas condiciones del suelo como su pH o la textura (proporciones de arena, limo y arcilla que tengan) alteran la biodisponibilidad de este elemento, pero no suelen influir en la cantidad de fósforo total de un suelo.

Sainz Rozas H & Echeverría H. 2011. Diagnóstico, recomendación y manejo de fósforo en la Región Pampeana. *Revista Fertilizar* 19 (2011)

El fósforo en la naturaleza puede estar como compuesto orgánico e inorgánico, Las plantas lo toman como fosfatos, que son compuestos inorgánicos muy sencillos, y lo transforman en compuestos orgánicos que se acumulan en las distintas partes de las plantas. La velocidad de transformación puede separarse en 5 Compuestos:

- Compuestos Inorgánicos de acceso lento
- Compuestos Orgánicos de acceso lento
- Compuestos Orgánicos lábiles
- Compuestos Inorgánicos lábiles
- Compuestos solubles, en su mayoría inorgánicos



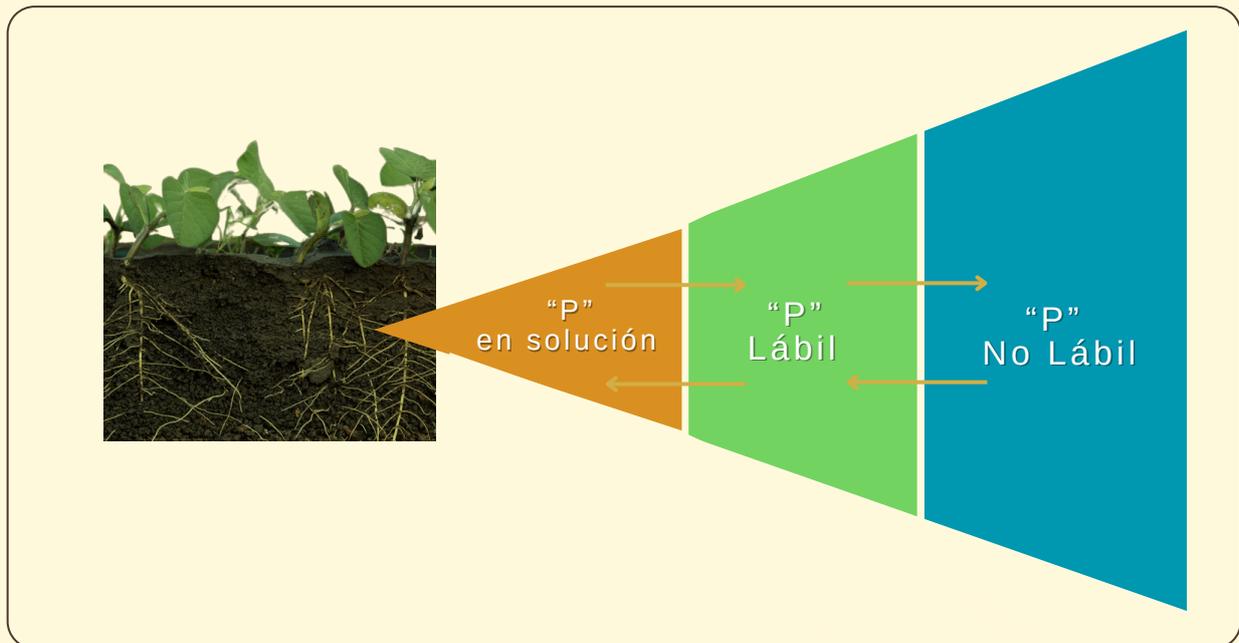
El fósforo lo encontramos en la naturaleza en compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. Las plantas lo toman como fosfatos, que son compuestos inorgánicos muy sencillos, y lo transforman en compuestos orgánicos que se acumulan en granos, hojas, tallos, raíces; por ejemplo las membranas de las células que forman los seres vivos tienen fósforo, así como la molécula responsable de la transmisión genética, el ADN, también tiene fósforo en su composición básica. En los suelos, encontramos compuestos de fósforo que, según la velocidad de sus transformaciones y su accesibilidad para la nutrición de las plantas, podemos separarlos en: Compuestos Inorgánicos de acceso lento, en los minerales primarios y secundarios (formas de reserva, no disponibles para las plantas). Compuestos Orgánicos de acceso lento, en residuos vegetales con grados de descomposición avanzados o físicamente protegidos (formas de reserva, no disponibles para las plantas). Compuestos Orgánicos lábiles (“moderadamente móviles”) en residuos vegetales frescos y la biomasa de los microorganismos (formas de reserva, no disponible para las plantas). Compuestos Inorgánicos lábiles (“moderadamente móvil”), en sales inorgánicas en solución, o en precipitados de alta solubilidad, o débilmente retenidos por las arcillas del suelo. Por último, encontramos compuestos solubles, en su mayoría inorgánicos (fosfatos) que no están retenidos y que están mayormente accesibles para las plantas y sujetos al movimiento con el agua del suelo.

García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

En el suelo el fósforo sufre transformaciones que son generadas por mecanismos fisicoquímicos o por descomposiciones de organismos.

En el suelo el fósforo puede ubicarse en 3 grupos de acuerdo con su estabilidad y accesibilidad:

- Formas solubles
- Formas lábiles
- Formas no lábiles

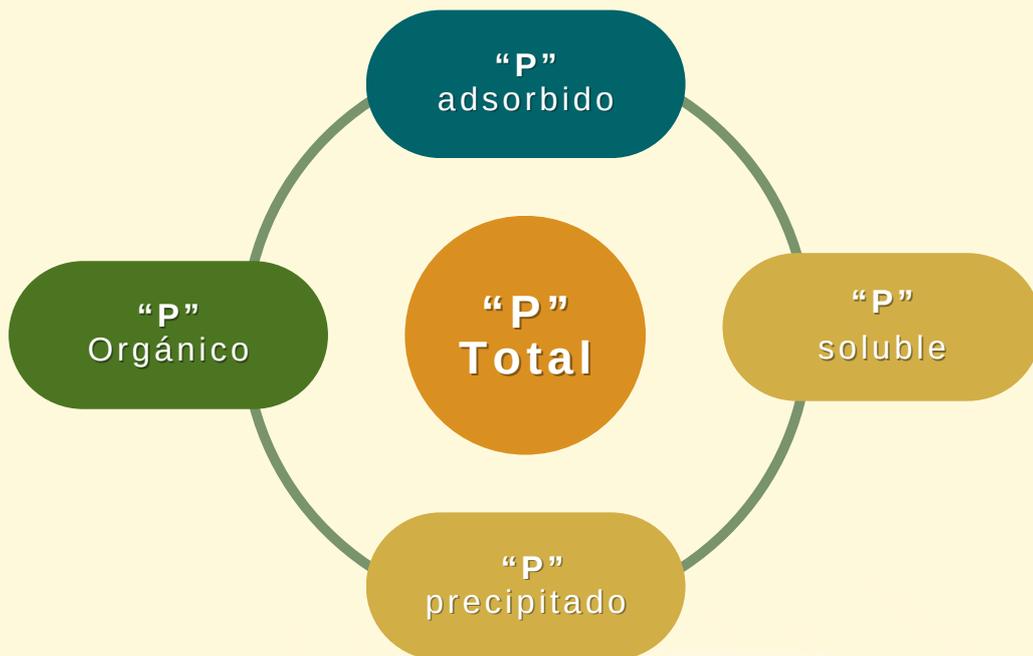


En el suelo no todo el fósforo es igual. Esto se explica porque el elemento sufre transformaciones en el suelo, en cambios que son puramente por mecanismos físicoquímicos o que están conducidos por procesos microbiológicos, especialmente a través de la descomposición de residuos orgánicos por hongos y bacterias. Pensando en el acceso de las raíces al fósforo del suelo, podemos separarlo en tres grupos de diferente disponibilidad en el tiempo: Formas solubles: Son los fosfatos en la solución del suelo, inmediatamente disponibles para la absorción radical, y que presentan la mayor movilidad entre todas las formas de fósforo. Formas lábiles: Son las formas que sin ser solubles, pueden modificarse bastante rápidamente ante cambios en las cantidades del fósforo en solución, por ello se las considera como la fracción de P del suelo que responde rápidamente a un descenso en la concentración de P en la solución del suelo cuando este es absorbido por las plantas, tendiendo a reponerlo con rapidez. Existen formas lábiles tanto orgánicas como inorgánicas. Formas no lábiles: Son aquellos compuestos fosfatados de muy alta estabilidad y cristalinidad, con valores muy bajos de solubilidad, que responden muy lentamente a cambios en la cantidad de fósforo soluble. Estas formas están escasamente relacionadas a la nutrición vegetal, y de la misma manera que con los compuestos lábiles, incluyen formas orgánicas e inorgánicas.

Almando, K, A. Duarte, E. González, D. Gómez, L. Quiñones. 2017. Química y Mineralogía del suelo. Fac. Ccias Agrarias, CONACYT, ProCiencia. San Lorenzo. Paraguay

Depende de los materiales originales de los suelos, es la suma los compuestos conteniendo este elemento. El fósforo en solución es por lejos el de menor proporción sobre la base total, y en los suelos está contenido en cantidades importantes en formas tanto orgánicas como inorgánicas.

La medición del fósforo total se realiza mediante digestión con ácido clorhídrico y otros ácidos fuertes, y adicionalmente no correlaciona con el crecimiento de las plantas, por lo que la medición de fósforo total no se usa con fines de determinar deficiencias para el crecimiento de las plantas

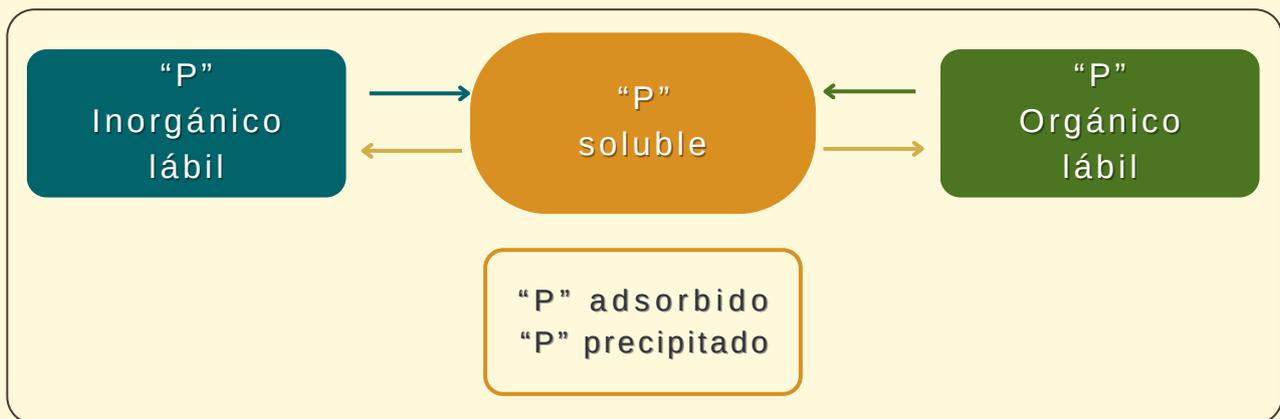


La cantidad de fósforo total que tiene un suelo depende de los materiales originales de los suelos (composición mineral, textura, etc.), aportes (fertilización, enmiendas, etc.) y salidas del sistema por extracciones (cosechas de granos, de forrajes, etc.) y pérdidas del sistema suelo-planta (por ejemplo por erosión hídrica). El contenido de fósforo total en los suelos es la suma los compuestos conteniendo este elemento independientemente de su forma y accesibilidad para las plantas. Si comparamos las cantidades de cada componente, el fósforo en solución es por lejos el que está en menor proporción que el resto de las fracciones que componen el fósforo total. El fósforo es un elemento que tiene la posibilidad de encontrarse en cantidades importantes tanto en formas inorgánicas (soluble, precipitado o adsorbido) como en formas orgánicas. La proporción de fósforo en formas orgánicas con respecto al total es variable, con un rango muy grande (entre el 15 y el 75% del P del suelo puede estar en estas formas), aumentando esta proporción en general en los suelos P Total P adsorbido P soluble P precipitado P orgánico 40 con altos contenidos de materia orgánica. Obviamente en suelos pobres en materia orgánica, la mayoría del fósforo se encuentra asociado a formas inorgánicas. La medición del fósforo total se realiza mediante digestión con ácido clorhídrico y ataques con ácidos nítrico, sulfúrico y perclórico y posterior medición de fosfatos, un método muy agresivo y riesgoso: sumado a esto, medir el fósforo total no tiene ninguna relación con el crecimiento de los organismos, por lo que la medición de fósforo total no se usa con fines de determinar deficiencias para el crecimiento de las plantas.

García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

En solución al fósforo lo encontramos como ortofosfatos, disponibles directamente para las plantas. Estas formas solubles se encuentran en equilibrio junto con el fósforo asociado a las partículas coloidales y a compuestos precipitados; si la cantidad de fósforo en solución disminuye (por absorción radical) o aumenta (por fertilización), el resto de los compuestos reacciona liberando fosfatos, o fijando los mismos, respectivamente.

La principal llegada del fósforo a las raíces es por difusión, es decir a distancias cortas por diferencias en concentración entre la rizósfera y la solución del suelo



En la solución del suelo encontramos el Fósforo como ortofosfatos inorgánicos rápidamente accesibles para las plantas. Estas formas solubles están en equilibrio con formas adsorbidas a partículas coloidales y compuestos precipitados, es decir que si las concentraciones de P soluble disminuyen (por ejemplo por absorción vegetal) o aumentan (por ejemplo por fertilización fosfatada), las otras fracciones van a responder con diferente velocidad o reponiendo fosfatos, o fijando los mismos, respectivamente. A diferencia del nitrógeno que llega a las raíces principalmente por flujo masal, la baja solubilidad de los fosfatos hace que la principal forma de llegada del fósforo sea por difusión, es decir a distancias cortas por diferencias en concentración entre la rizósfera y la solución del suelo.

García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

El fósforo es un elemento químico que en los suelos forma compuestos que tienen baja solubilidad general, pero el pH, que refiere a las condiciones de acidez o alcalinidad de los suelos, regula esta solubilidad.

Cuando un suelo tiene pH's alcalinos, superiores a 7, los fosfatos se asocian al catión más abundante, el calcio, formándose fosfatos cálcicos insolubles.

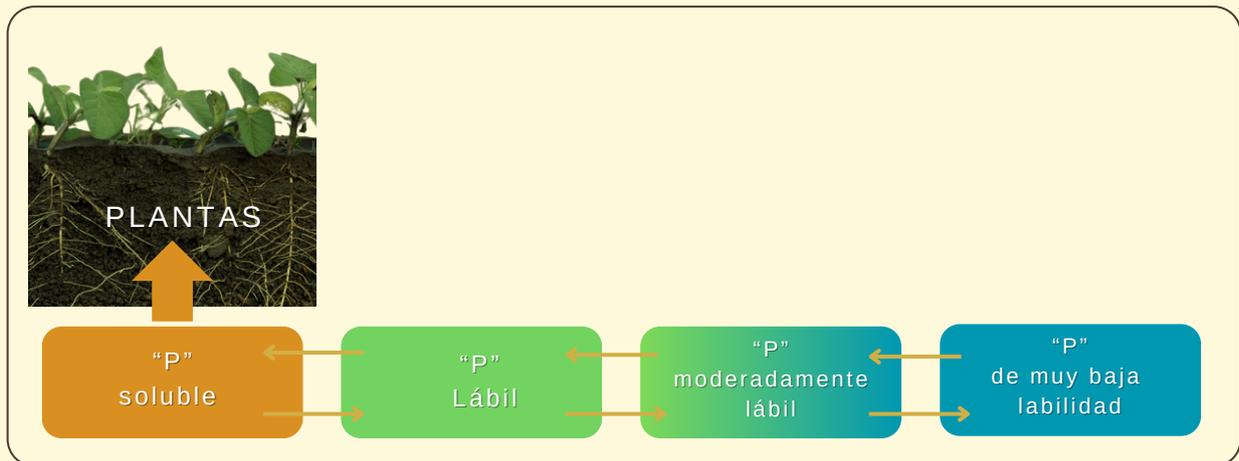
Por el contrario, cuando un suelo se acidifica los fosfatos forman sales insolubles de aluminio o de hierro, requiriéndose medidas correctivas para asegurar la disponibilidad de fósforo para las plantas.



Las raíces pueden solamente absorber exitosamente los elementos que se encuentran solubles en el agua, por lo que los elementos que se encuentran en formas insolubles no están biodisponibles. El fósforo es un elemento químico que en los suelos forma compuestos que tienen baja solubilidad: es por ello que se considera que el fósforo es un elemento "inmóvil", y es conocido que mucho del fertilizante que se aplica a los suelos "reacciona" con los mismos, no estando inmediatamente disponibles. No obstante hay un parámetro o condición que regula fuertemente la solubilidad del fósforo en los suelos: el pH, que refiere a las condiciones de acidez o alcalinidad de los suelos. Las formas solubles de P son más lábiles (menos estables) en un rango de pH 6,5 y 7,5 (condiciones próximas a la neutralidad o levemente ácidas) Cuando un suelo tiene pH's alcalinos, superiores a 7, los fosfatos se asocian al catión más abundante, el calcio, formando fosfatos de calcio, que son minerales muy insolubles (los dientes o los huesos por ejemplo están formados por fosfatos cálcicos). Sin embargo, con pH's superiores a 8,5 los fosfatos en este caso se asocian al ión sodio, formando sales que son más solubles, aumentando en definitiva la solubilidad y movilidad de los fosfatos; debe recordarse que la presencia de sodio genera fenómenos indeseables (dispersión y compactación) en los suelos que pueden afectar la salud física de los suelos y el crecimiento de las plantas. Por el contrario, cuando un suelo se acidifica los fosfatos forman sales insolubles de aluminio (pH menor a 6) y hierro (pH menor a 4-4,5); esta formación de sales disminuye severamente la solubilidad. Adicionalmente, en suelos ácidos aumentan las cargas positivas del sistema, aumentando también la retención electrostática de los fosfatos (negativos) sobre las arcillas que se cargan positivamente: esto conlleva a que los suelos ácidos, como los de las zonas tropicales, retienen muy fuertemente a los fosfatos, limitando la absorción por las plantas, y se vuelve indispensable el uso de prácticas como el encalado para subir el pH y evitar esta fuerte reacción del suelo.

García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. *Fósforo*, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

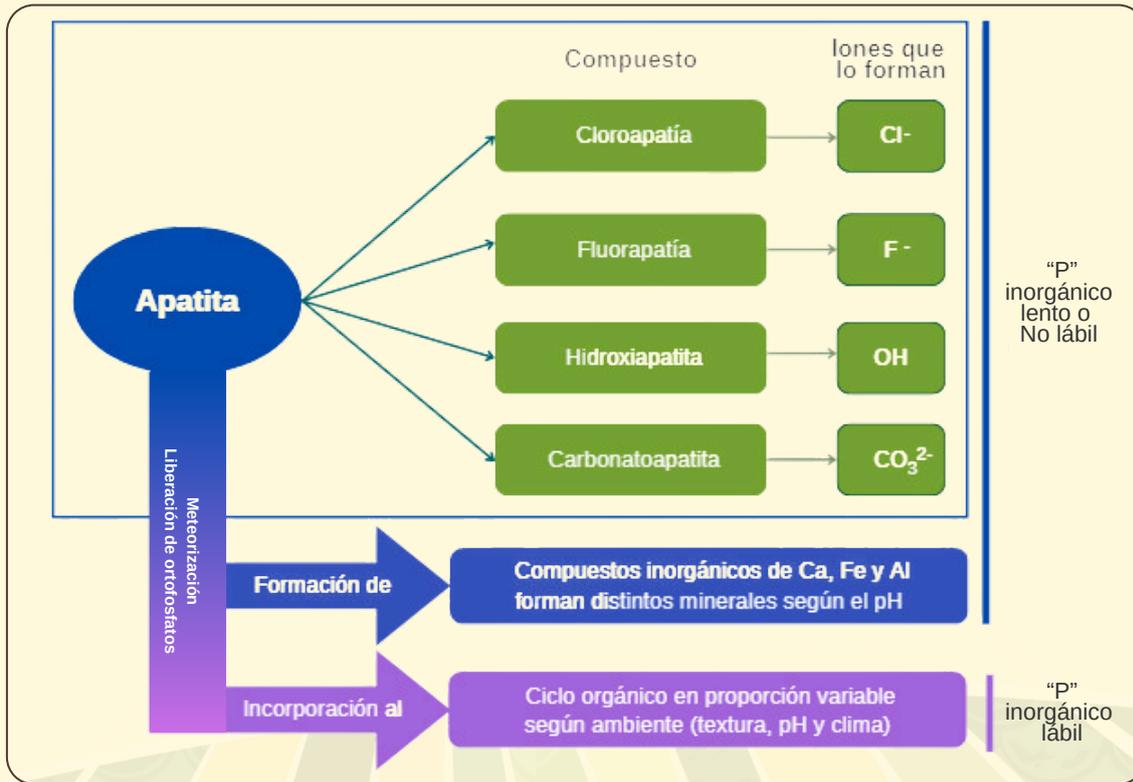
Las plantas incorporan fósforo en formas inorgánicas solubles. La cantidad de fósforo disponible soluble es muy poca, no mayor a $0,05 \text{ mg P L}^{-1}$, y varía según condiciones físicas, químicas y biológicas. Por ello, para satisfacer las necesidades de los cultivos que crecen intensamente, debe reponerse entre 20 y 50 veces por día, La fertilización incrementa inmediatamente las formas solubles por fertilización, aumentando el fósforo disponible para las plantas.



Las plantas incorporan Fósforo en formas inorgánicas solubles, fosfatos monoácidos (HPO_4^{-2}) y fosfatos diácidos ($\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$) que se encuentran en solución. La cantidad de fósforo disponible (accesible) es una proporción mucho menor del total del elemento que encontramos en los suelos y varía según condiciones físicas, químicas y biológicas en interacción con características de las plantas, y cuando se consume es repuesta por las formas de p lábiles orgánicas e inorgánicas. La cantidad de P en solución no suele superar la concentración de $0,05 \text{ mg P L}^{-1}$, por lo que para satisfacer las necesidades de los cultivos que crecen intensamente, debe reponerse entre 20 y 50 veces por día. Al aumentar las formas solubles por fertilización se incrementa el fósforo disponible (potencialmente accesible para las plantas).

García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

El fósforo que está en los suelos se relaciona con la presencia en el material original de un mineral llamado apatita. El fósforo de la apatita se va liberando a través de los procesos de descomposición y lejos de quedar soluble pasa a formar compuestos inorgánicos con solubilidad reducida, como sales de calcio, aluminio o hierro. Por otro lado, el fósforo puede quedar en forma inorgánica como fosfatos adsorbidos sobre las cargas positivas de las superficies de las partículas más pequeñas de los suelos. La magnitud de esta retención superficial varía de acuerdo con el pH y se relaciona directamente con la cantidad de arcillas y materia orgánica del suelo.



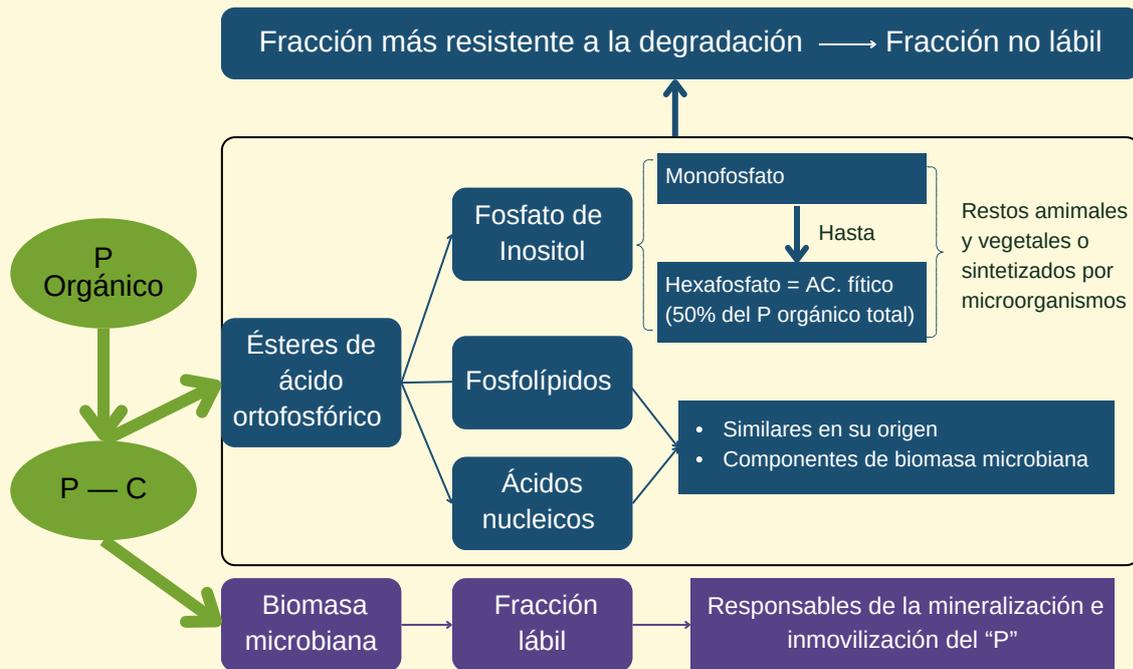
El fósforo que está en los suelos se relaciona con la presencia en el material original de un mineral llamado apatita, que básicamente son fosfatos de calcio, acompañado con otros aniones como el flúor, el cloro, hidróxidos o carbonatos. Al día de hoy en muchos suelos todavía hay fósforo inorgánico fijado en minerales derivados de la apatita del material original. El fósforo de la apatita se va liberando a través de los procesos de descomposición, la meteorización, pero el fósforo liberado, lejos de quedar soluble, pasa a formar otros compuestos inorgánicos de solubilidad reducida - Por un lado, compuestos establecen forma de sales inorgánicas de fósforo con calcio (pH alto), o hierro y aluminio (pH bajo) resultan de la meteorización de los minerales de apatita.-. Por otro lado, el fósforo puede quedar en forma inorgánica como fosfatos adsorbidos sobre las cargas positivas de las superficies de las partículas más pequeñas de los suelos, los coloides, como las arcillas y la materia orgánica estabilizada. En zonas tropicales, los fosfatos también pueden quedar retenidos sobre los óxidos y arcillas tipo caolinita que abundan en estos suelos. 48 La magnitud de esta retención superficial varía de acuerdo al pH (a más bajo, más retención de fósforo), y se relaciona directamente con la cantidad de arcillas y materia orgánica del suelo. Mucho del fósforo retenido superficialmente es considerado no lábil, especialmente en los suelos de gran capacidad de retención como pueden ser los suelos tropicales o muy arcillosos, ya que la unión entre el fósforo y el coloide es a través de enlaces químicos muy fuertes (denominados complejos de esfera interna).

García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

Las formas orgánicas de P son compuestos carbonados que contienen fósforo en formas químicas variadas. El contenido de fósforo en la materia orgánica varía entre 1 y 3%.

Hay muchas formas de fósforo orgánico que todavía no han sido correctamente identificadas. Dentro de las formas que han podido ser identificadas, la mayoría son ésteres del ácido ortofosfórico, básicamente como ácido fítico.

Una forma lábil de fósforo son los residuos vegetales y animales poco descompuestos. Otra parte del fósforo orgánico lábil está en la biomasa de los microorganismos del suelo.



Las formas orgánicas de fósforo son compuestos carbonados que contienen fósforo en formas químicas variadas y no específicas o definidas. Hay muchas formas de fósforo orgánico que todavía no han sido correctamente identificadas, debido a lo dificultoso del estudio de la estructura de la materia orgánica de los suelos. Dentro de las formas que han podido ser identificadas, la mayoría se encuentra principalmente como ésteres del ácido ortofosfórico, siendo el compuesto más abundante el ácido fítico (la reserva de fósforo de las semillas). Las fracciones químicas de mayor peso molecular son los compuestos más resistentes a la degradación (menos lábiles). Una forma lábil de fósforo son los residuos vegetales y animales poco descompuestos, estos tienen poca protección física (no pueden adsorberse a las arcillas), por lo que pueden degradarse rápidamente y liberar fosfatos al medio. Otra parte importante del fósforo orgánico lábil se encuentra en la biomasa de los microorganismos del suelo, ya que estas poblaciones responden rápidamente a cambios ambientales, pudiendo crecer e incorporar nutrientes como el fósforo, cuando las condiciones son adecuadas. Mientras que pueden dejar de crecer y liberar los nutrientes en períodos de tiempo muy cortos cuando las condiciones de crecimiento (disponibilidad de alimento, temperatura, humedad, etc.) ya no son tan propicias. El contenido de fósforo en la materia orgánica varía entre 1 y 3%, y a diferencia del N, la relación C/P no es tan estable, lo que implicaría que el fósforo no tiene un rol estructural en la materia orgánica; no obstante suele ser usada la relación C:N:P de la materia orgánica de 100:10:1

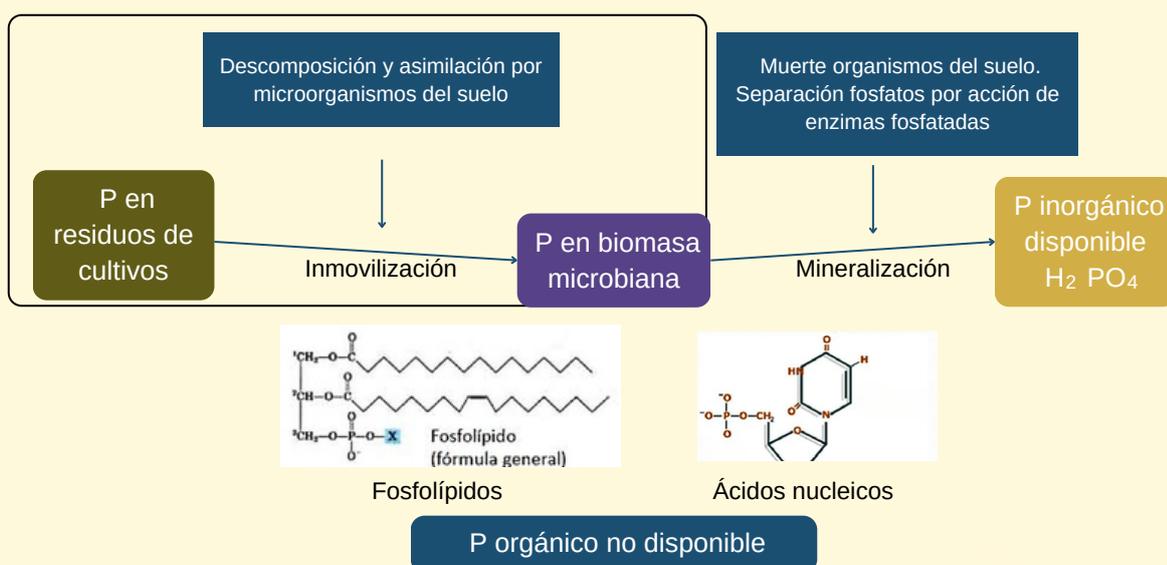
García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

En un ciclo dinámico, el fósforo circula entre varias fracciones, interconectando fracciones orgánicas como el fósforo contenido en los residuos de los cultivos y de los animales, con fracciones inorgánicas solubles, a través de dos procesos:

A. Inmovilización: Los microorganismos del suelo, descomponen la materia orgánica de los residuos y la asimilan para sus propias estructuras

B. Mineralización: El fósforo orgánico puede ser transformado en mineral como subproducto de la mineralización de materia orgánica en el suelo o mediante la acción de enzimas específicas que son reguladas por la demanda de este nutriente

Los procesos de mineralización e inmovilización microbiana ocurren siempre y simultáneamente en todos los suelos.



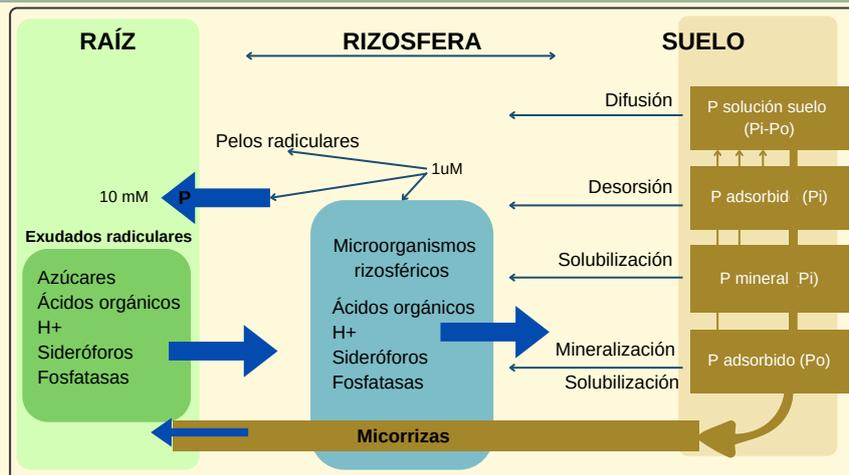
En un ciclo dinámico, para que el fósforo contenido en los residuos de los cultivos y de los animales sea asimilable deben pasar por dos procesos: Inmovilización: Los microorganismos (bacterias, hongos) del suelo, descomponen la materia orgánica de los residuos y la asimilan para sus propias estructuras, incorporándolo a sus propios cuerpos. De esa manera, el fósforo no queda disponible para las plantas y tampoco queda sujeto a movimientos con el agua del suelo. Mineralización: El fósforo orgánico puede ser transformado en mineral como subproducto de la mineralización de materia orgánica en el suelo o mediante la acción de enzimas específicas que son reguladas por la demanda de este nutriente (Picone y Zamuner, 2002). En el primer caso, llamado mineralización biológica, los microorganismos buscan obtener energía de los compuestos carbonados, liberando al fósforo que se encuentra ligado con uniones C-P; en este caso es la demanda de energía la que regula la intensidad del proceso. En el segundo caso, cuando las concentraciones de fósforo en el suelo son bajas, los microorganismos sintetizan y secretan enzimas extracelulares específicas (fosfatasa) para poder obtener el fósforo fijado en las estructuras orgánicas. En cualquier caso, la mineralización del fósforo está regulado por todos los factores que regulan la actividad biológica y enzimática: temperatura y humedad del suelo, pH, disponibilidad de otros nutrientes, etc. Los procesos de mineralización e inmovilización microbiana ocurren siempre y simultáneamente en todos los suelos: que proceso predomina depende de la relación C:P de los residuos o material orgánico que esté proveyendo la energía para la vida de los microorganismos. Con relaciones C:P mayores a aproximadamente 300 (concentración de P del material orgánico cercana a 0,3%), la demanda por el fósforo es alta, predominando la inmovilización del nutriente; Por el contrario, con relaciones C:P menores a 200 (concentraciones cercanas a 0,2%) la mineralización de fósforo orgánico es el proceso dominante.

Picone, L.; Zamuner, E. 2002. *Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. Informaciones Agronómicas del Cono Sur.* Págs. 11 – 15. Tun-Che, Rodrigo E. 2018. *Microorganismos solubilizadores de fósforo mineral y su importancia en la agricultura.* <https://sciellage.wordpress.com/2018/07/14/microorganismos-solubilizadores-deFósforo-mineral-y-su-importancia-en-la-agricultura/> Accedido 11Abr 2020

La participación de los microorganismos en la nutrición fosforada de plantas es fundamental a través de varios mecanismos diferentes.

Por un lado, un amplio grupo de microorganismos descomponen materiales orgánicos en busca de energía liberando fósforo. Por otro lado, algunos microorganismos próximos a las raíces mejoran la solubilidad del fósforo facilitando diferentes procesos fisicoquímicos.

Finalmente, hongos y bacterias rizosféricas pueden mejorar la nutrición con fósforo de las plantas al estimular a las raíces y la exploración de P



La participación de los microorganismos en la nutrición fosforada de plantas es fundamental a través de varios mecanismos diferentes. Por un lado, un amplio grupo de microorganismos que incluyen hongos, bacterias y actinomicetes descomponen (mineralizan) materiales orgánicos en busca de energía, y en este camino liberan activamente el fósforo contenido en ellos. Cuando las condiciones de deficiencia de fósforo para los organismos son intensas, incluso pueden secretar al medio enzimas específicas para la liberación de fósforo, fosfatasa, que escinden los grupos fosfatos de cadenas carbonadas extensas. En segundo lugar, un determinado grupo de hongos que existen en todos los suelos del planeta, las micorrizas (de mico: hongo y riza: raíz) se asocia a las raíces de la mayoría de las plantas vasculares, en una relación mutualista, donde ambas especies ganan. El beneficio obtenido por la planta es que el hongo, que presenta un gran número de ramificaciones (denominadas "hifas"), aumenta la capacidad de absorción desde el suelo de agua y nutrientes poco móviles como el fósforo. Por su parte, el hongo se beneficia en que obtiene energía para vivir, proveniente de azúcares que generan las plantas por fotosíntesis y son transferidos a los hongos. Estos hongos pueden tener hifas creciendo dentro de las células de las raíces de las plantas (endomicorrizas), o pueden crecer en los espacios intercelulares (ectomicorrizas). Las micorrizas se pueden asociar con las raíces de casi todos los cultivos comerciales, y su función nutricional es muy relevante en suelos deficientes en fósforo. Por otro lado, algunos microorganismos rizosféricos (próximos a las raíces) mejoran la solubilidad del fósforo participando y facilitando diferentes procesos físico-químicos al liberar ácidos orgánicos (Ej. oxálico, cítrico, butírico, malónico, láctico, etc) y sideróforos solubilizan fosfatos precipitados y otros compuestos estables (meteorización de minerales, solubilización, etc.). La capacidad de los ácidos orgánicos para aumentar la disponibilidad de P, no sólo se debe a la acidificación en la rizósfera de la planta, sino también a su capacidad de formar complejos estables con el aluminio y el hierro (si estos elementos están solubles, precipitan con el fósforo, limitando su disponibilidad). La producción y liberación de sideróforos, moléculas secretadas por microorganismos, provoca que se libere el fósforo que se encuentra precipitado firmemente (insoluble, no disponible) con el hierro. Las plantas también pueden sintetizar sideróforos, en ese caso se denominan fitosideróforos. Finalmente, hongos y bacterias rizosféricas pueden mejorar la nutrición con fósforo de las plantas al estimular por diferentes mecanismos el crecimiento de las raíces y así aumentar la exploración e incorporación del fósforo.

Richardson, A.E., Hadobas, P.A., Hayes, J.E., O'Hara, C.P., Simpson, R.J. (2001) Utilization of phosphorus by pasture plants supplied with myo-inositol hexaphosphate is enhanced by the presence of soil microorganisms. *Plant and Soil*, 229:47-56

Los contenidos totales de fósforo en el suelo no sirven para indicar si las plantas van a tener disponibilidad de fósforo suficiente.

Entonces ¿cómo hacemos para saber si hay suficiente cantidad de fósforo en un suelo? Una posibilidad es buscar una forma de medir en forma conjunta el contenido soluble más el fósforo que puede ser provisto desde las fracciones de fósforo que pueden liberar fósforo soluble (P lábil).

Para diagnosticar limitaciones en la normal nutrición con fósforo se desarrollaron y calibraron diferentes métodos de laboratorio que extraen formas lábiles con diferentes extractantes.

Los contenidos totales de fósforo en el suelo no sirven para indicar si las plantas van a tener disponibilidad de fósforo o no, ya que mucho de ese fósforo está en formas resistentes que las plantas no pueden absorber. Las raíces de las plantas absorben el fósforo que está en la solución (agua) del suelo, pero esa cantidad es muy pequeña, se repone varias veces por día en cultivos que crecen rápido, y por ello tampoco tiene mucho valor de diagnóstico medir el fósforo en solución. Entonces ¿cómo hacemos para saber si hay suficiente cantidad de fósforo en un suelo? Una posibilidad es buscar una forma de medir en forma conjunta el contenido soluble más el fósforo que puede ser provisto desde las fracciones de fósforo que pueden liberar fósforo soluble (P lábil). El abastecimiento de las formas inorgánicas lábiles en la solución del suelo que usan las plantas en su nutrición es dinámico, complejo y participan diversos compuestos con fósforo. Entonces, para diagnosticar limitaciones en la normal nutrición con fósforo (o respuestas a su aplicación al fertilizar) se desarrollaron y calibraron diferentes métodos de laboratorio que extraen formas lábiles de este elemento, medición que se ha denominado “Fósforo Extractable”:

Método de P extractable	Comentarios	Fuente	País
Bray Kurtz 1	Suelos ácidos y neutros	Bray y Kurtz, 1945	Uruguay y Argentina
Olsen	Suelos alcalinos. También suelos neutros y ácidos	Olsen y col., 1954	Chile y Bolivia y zonas de riego de Argentina
Mehlich 1	Multinutrientes suelos ácidos	Mehlich, 1953	Brasil
Mehlich 3	Multinutrientes amplio rango de suelos. Correlaciona con Bray 1, Mehlich 1 y Olsen	Mehlich, 1984	EEUU
AB-DTPA	Multinutrientes en suelos alcalinos	Soltanpour y Schwab, 1977	
Morgan y Morgan modificado	Multinutrientes en suelos ácidos. No adaptado para suelos calcáreos	Morgan, 1941	Noroeste de EEUU
Egner	Multinutriente	Egner y col., 1960	Europa
Resinas de intercambio aniónico	Métodos de destinos del P Reacciones sorción-desorción	Imitan las condiciones de la rizosfera	Brasil
Membranas de intercambio iónico			
Papel impregnado con óxido de hierro			

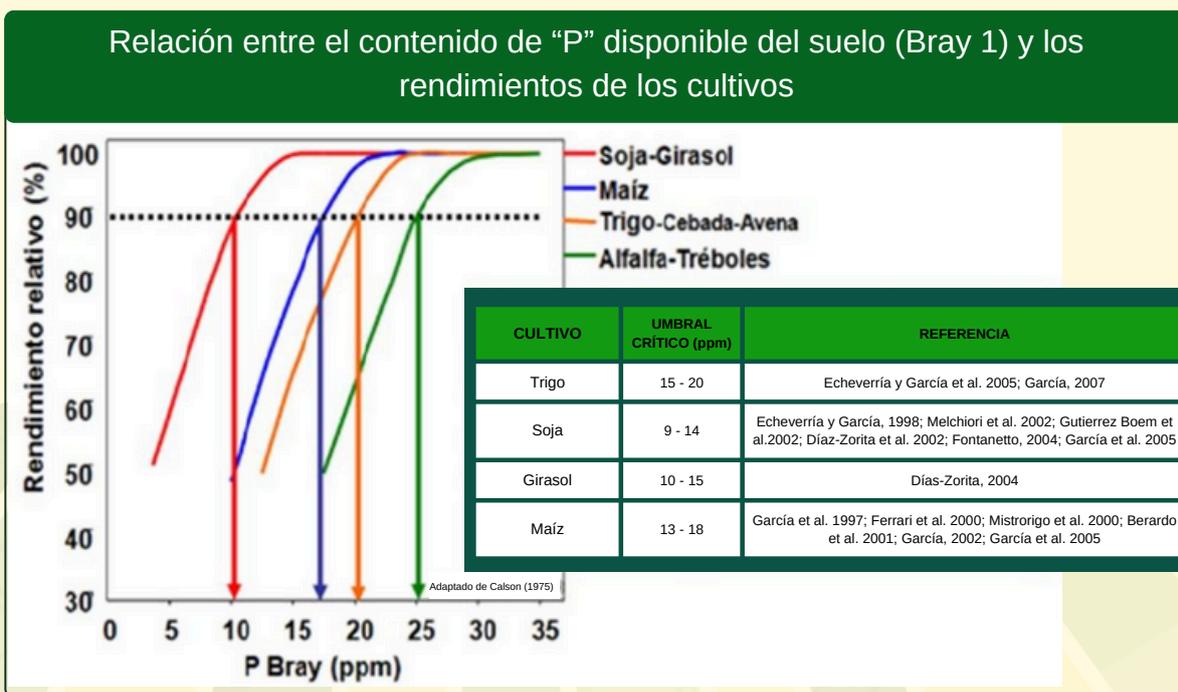
La acidez y la composición de minerales que tiene un suelo modifica la cantidad y las formas en las que se encuentra el fósforo asociado a los diferentes compuestos donde puede fijarse el fósforo del suelo, con variada biodisponibilidad. Es por ello que el método elegido debe contemplar las características fisicoquímicas del suelo, donde el fósforo extractable va a ser medido y, por lo tanto, en diferentes tipos de suelos, con distinta acidez y composición textural. Se utilizan diferentes condiciones de extracción con soluciones químicas, que remueven el fósforo por disolución ácida, intercambio aniónico, formación de complejos con cationes e hidrólisis de cationes (Tabla). En la Argentina, y particularmente en la región pampeana donde predominan suelos levemente ácidos a neutros, el extractante más utilizado es el Bray Kurtz 1. Aunque la extracción por Olsen también podría ser adecuada para las condiciones de los suelos de la Región Pampeana, esta metodología quedó relegada a suelos alcalinos o a zonas específicas.

Cox, 1994, Kamprath y Watson, 1980, Sharpley, 1991. Pag: 244-246 García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

La medición de fósforo extractable no mide el contenido total a ser absorbido por las plantas, sino que es un indicador de disponibilidad. Para que este índice tenga valor diagnóstico, es preciso que se contraste con valores de rendimiento de los diferentes cultivos. La correlación nos ayuda a decidir si una cantidad de P extractable es suficiente para satisfacer los requerimientos de los cultivos o no.

Los métodos de extracción de fósforo de los suelos se desarrollaron y se calibraron para pronosticar condiciones de respuesta a la fertilización con fósforo. Estos modelos siempre presentan cierta incertidumbre, las calibraciones son más exactas en predecir la probabilidad de la respuesta a la fertilización con P que para definir una dosis exacta de fertilizante a aplicar.

La medición de fósforo extractable no mide el contenido total a ser absorbido por las plantas. De hecho, al ser un nutriente de tan elevada reactividad y baja movilidad en el suelo, no podría medirse con facilidad una cantidad disponible absoluta. Es por ello que la medición de fósforo extractable, que intenta medir la disponibilidad inmediata de fósforo más la reposición del suelo en el mediano plazo, es (aunque tenga unidades de concentración: ppm o mg kg⁻¹) un índice o indicador de suficiencia de cultivo, y como cualquier índice no puede ser considerado como un número aislado. Para que este índice tenga valor diagnóstico, es preciso que se contraste (correlacione) con valores de rendimiento o productividad de los diferentes cultivos, de modo de poder interpretar los valores provistos por los laboratorios, como puede verse en la figura, que relaciona el P Bray (extracción con Bray & Kurtz 1, el más usado en el país) con los rendimientos de los principales cultivos agrícolas:



Como puede verse, la correlación nos ayuda a decidir si una cantidad de P extractable es mucha o poca: por ejemplo, 15 ppm parecen ser más que suficientes para soja, bastante adecuados para maíz y limitantes para el trigo. 61 Los métodos de extracción de fósforo de los suelos se desarrollaron y se calibraron para pronosticar condiciones de respuesta a la fertilización con fósforo resultando requieren una gran cantidad de datos para ser sólidos, es por ello que la mayoría han sido calibrados por estudios en centros de investigación como las Universidades o el INTA. Debido a que más allá de la cantidad de datos que se usan, estos modelos siempre presentan cierta incertidumbre, las calibraciones son más exactas en predecir la probabilidad de la respuesta a la fertilización con P que para indicar directamente una dosis de fertilizante a aplicar: se requiere para ello el procesamiento de información adicional (cultivo, condición de crecimiento, forma de aplicación del fertilizante, criterio económico de aplicación, etc.).

Fixen, P.E. & J.H. Grove. 1990. Soil testing and plant analysis, p. 141-180. In R.L. Westerman (ed.). Testing soils for phosphorus. Soil Science Society America Book Number 3, Madison, Wisconsin, EEUU.

La cantidad de fósforo extractable se destaca como una de las variables de suelos más heterogéneas, con una altísima variabilidad espacial. La cantidad de fósforo extractable de los suelos varía, horizontalmente (entre posiciones entre lotes y dentro de estos, aún en distancias pequeñas) y verticalmente (en el perfil de los suelos en interacción con condiciones originales y con el manejo de suelos y cultivos).

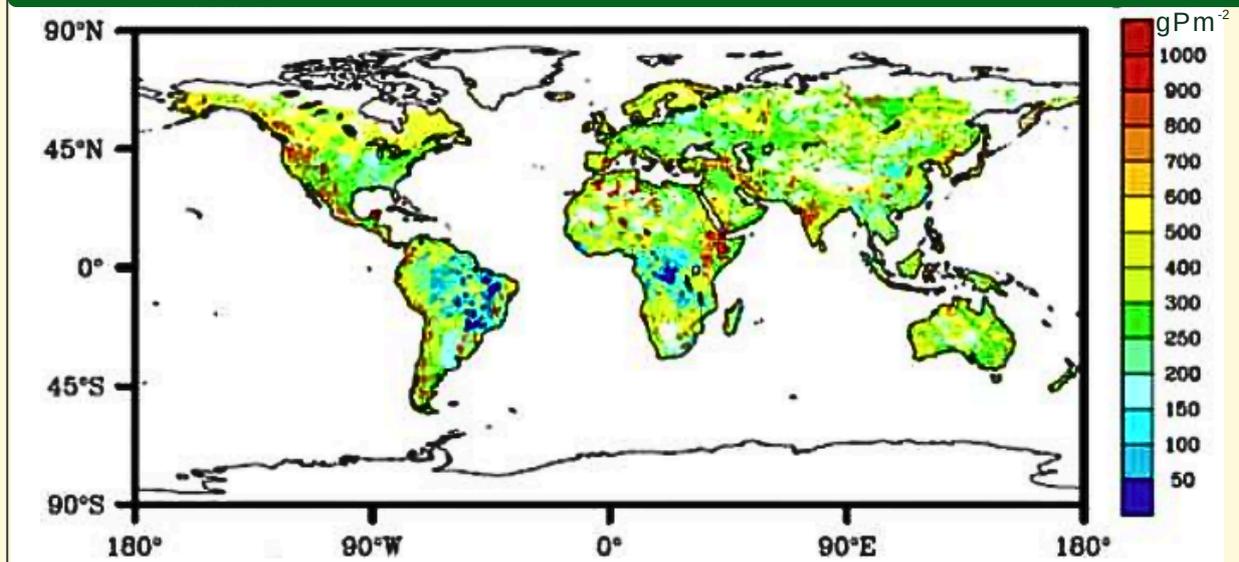
Es claro que mucha de la variabilidad ambiental que luego se relaciona con los rendimientos se relaciona a la variabilidad en propiedades de los suelos, por lo que el manejo preciso por ambiente o sitio específico podría ser una alternativa viable.

El suelo es uno de los medios naturales más variables, independientemente de la escala en que se lo mire. Entre las diferentes propiedades del suelo que suelen ser medidas, la cantidad de fósforo extractable se destaca como una de las más heterogéneas, con una altísima variabilidad espacial.

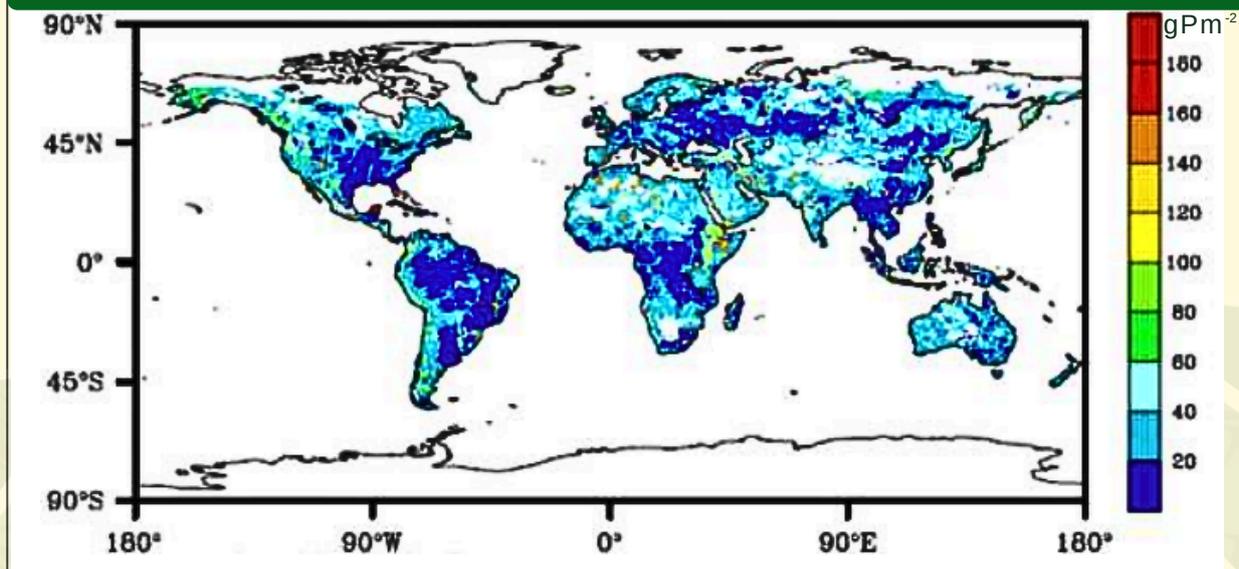


Aún con similares tipos de suelos y condiciones de manejo, la cantidad de fósforo extractable de los suelos varía, horizontalmente (entre posiciones entre lotes y dentro de estos, aún en distancias pequeñas) verticalmente (en el perfil de los suelos en interacción con condiciones originales y con el manejo de suelos y cultivos) La presencia de viejas aguadas o molinos también conducen a la existencia de parches con muy alta cantidad de fósforo en algunas partes del lote, que no son visibles a simple vista. Es claro que mucha de la variabilidad ambiental que luego se relaciona con los rendimientos se relaciona a la variabilidad en propiedades de los suelos, como por ejemplo la disponibilidad de fósforo, por lo que en muchos lotes agrícolas podría ser recomendable el manejo sitio específico de fósforo para aumentar la eficiencia de los fertilizantes aplicados.

“P” Total



“P” Lábil inorgánico

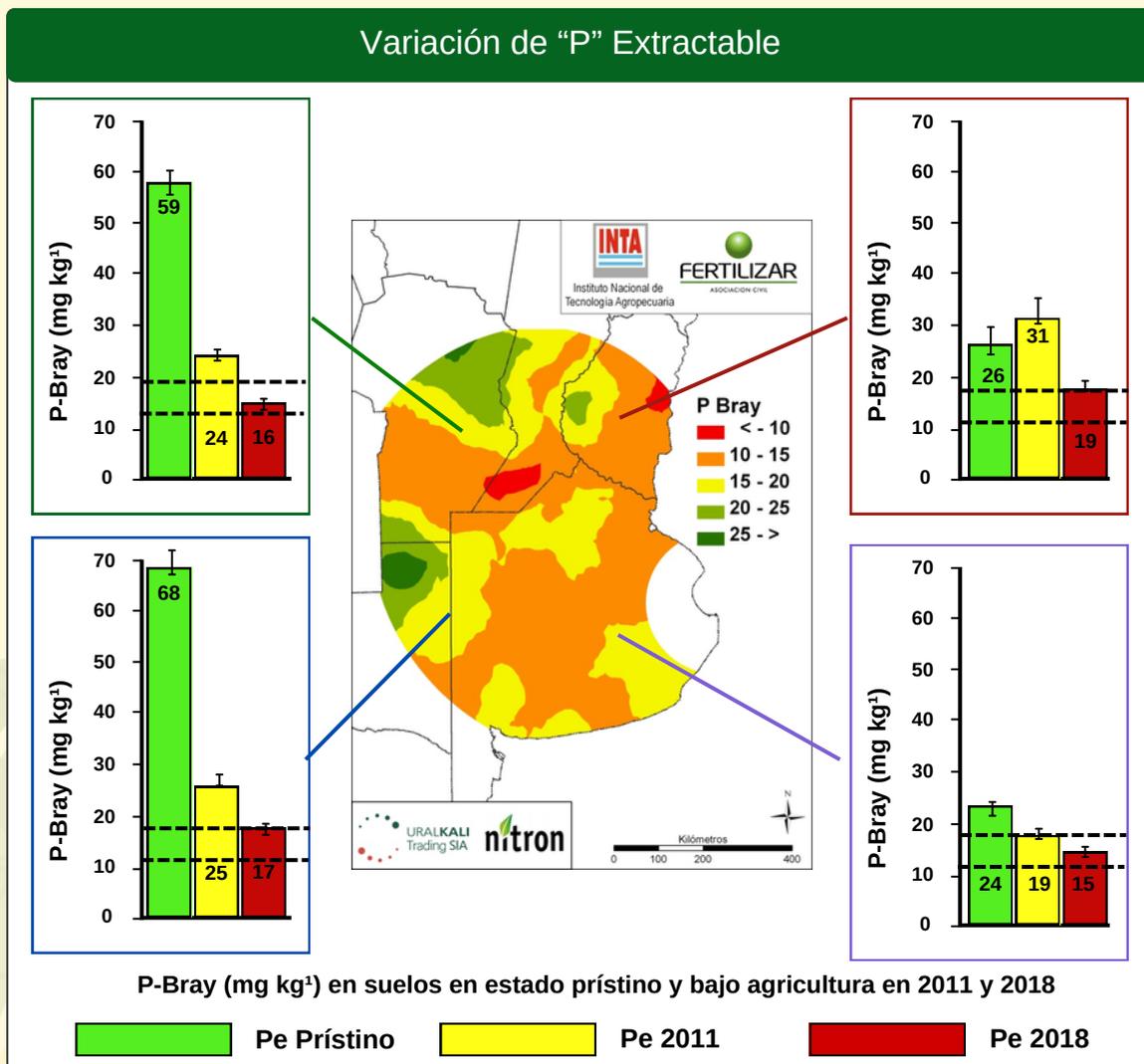


Los niveles de Fósforo total varían regionalmente según la composición de los minerales originales, el grado de meteorización y otras condiciones edafoclimáticas (pH, textura, régimen de humedad, etc.) y de manejo (balance entre aportes y extracciones, etc.).

Yang, X., W.M. Post, P.E. Thornton y A. Jain. 2013. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. *Biogeosciences* 10: 2525-2537. <https://doi.org/10.5194/bg-10-2525-2013>

La disponibilidad de fósforo no es estable en el tiempo en los sistemas agrícolas. Al intensificar la producción con limitada reposición de fósforo, los niveles de fosforo extractable en la región Pampeana disminuyeron. ampliando el área con sitios limitados en este nutriente.

La cantidad de fósforo extractable, el índice que usamos para diagnosticar la disponibilidad de fósforo para las plantas, no es estable en el tiempo en los sistemas agrícolas, dado que los cultivos y forrajes absorben en grandes cantidades este elemento, siendo uno de los tres nutrientes, junto con el nitrógeno y el potasio, considerado macronutriente.



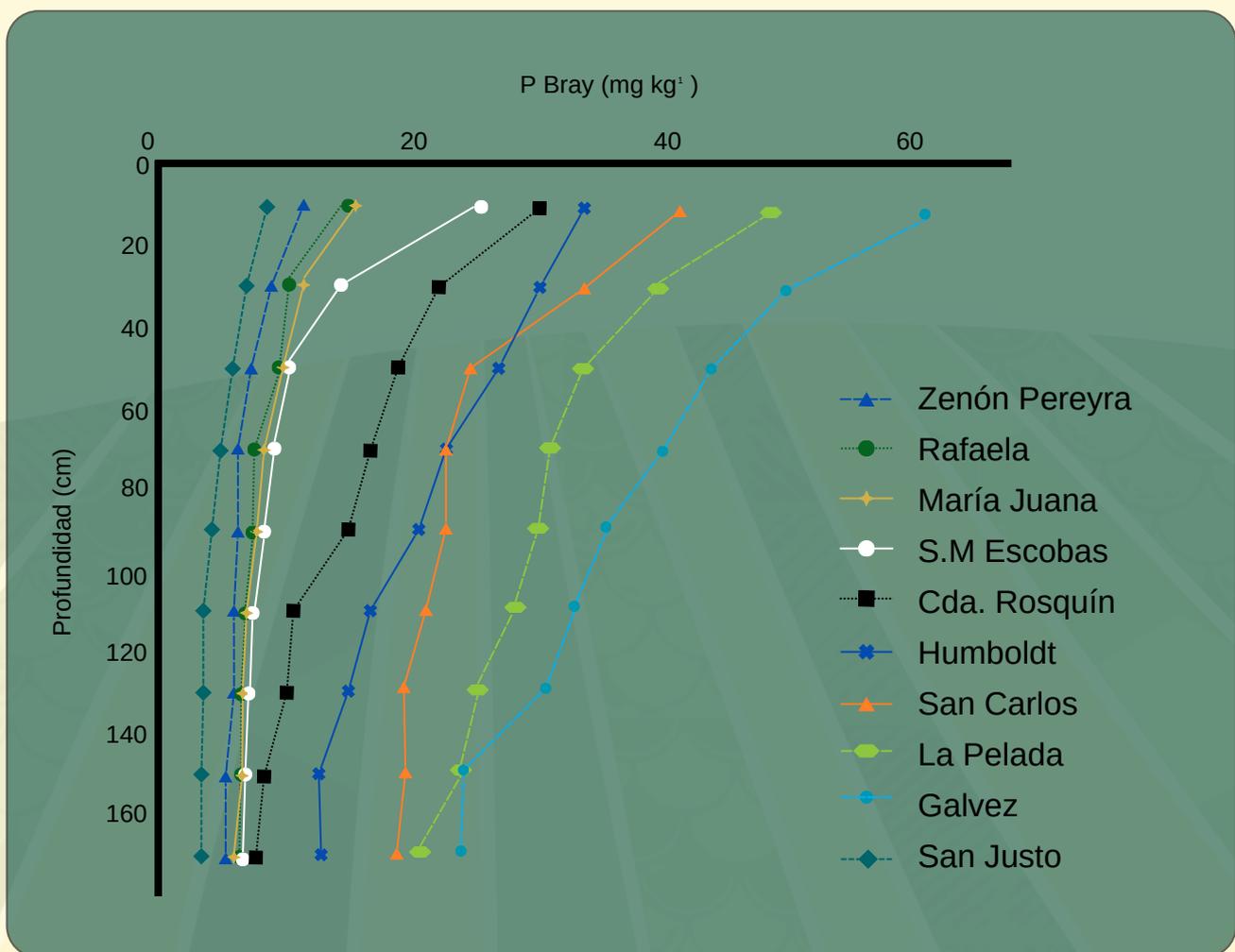
Al intensificar la producción con limitada reposición de fósforo, generando balances que son negativos para todos los cultivos, los niveles de Fósforo extractable de los suelos de la Región pampeana disminuyeron, y se amplió el área con sitios limitados en este nutriente. En promedio, entre 2011 y 2018 los niveles de Fósforo extractable se redujo a razón de 1,14 ppm/año, con caídas mayores en el sur de Córdoba y Santa Fe, Oeste de Buenos Aires y La Pampa.

Sainz Rozas, H. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. En: Simposio Fertilidad 2019. CABA. Argentina, Fertilizar AC.

Los niveles de fósforo extractable no son uniformes en profundidad debido a que las capas que dieron lugar a los suelos tenían cierta variabilidad de P.

El uso y las prácticas de labranza de los suelos agrícolas también modifican la tendencia de los contenidos de fósforo extractable en profundidad, esto se da por el depósito y transformación de residuos orgánicos y mayor concentración de raíces y por la ubicación superficial de los fertilizantes con fosforo.

Los niveles de fósforo extractable no son uniformes en profundidad, en principio porque las capas de sedimentos que dieron lugar a los suelos presentaban contenidos diferentes de este elemento. Además, algunas propiedades de los suelos (pH, textura, materia orgánica, etc.) al variar en profundidad también modifican los niveles de fósforo extractable. Aunque no es una regla absoluta, los niveles de fósforo extractable suelen disminuir en profundidad, asociado a la disminución en materia orgánica que hay en casi todos los suelos. El uso y las prácticas de labranza de los suelos agrícolas también modifican la tendencia de los contenidos de fósforo extractable en profundidad. En sistemas sin remoción (siembra directa, pasturas, pastizales, etc.) los niveles extractables de fósforo tienden a estratificarse acumulándose en las capas superficiales de los suelos. Este comportamiento es por el depósito y transformación de residuos orgánicos y mayor concentración de raíces y por la ubicación de los fertilizantes con Fósforo.

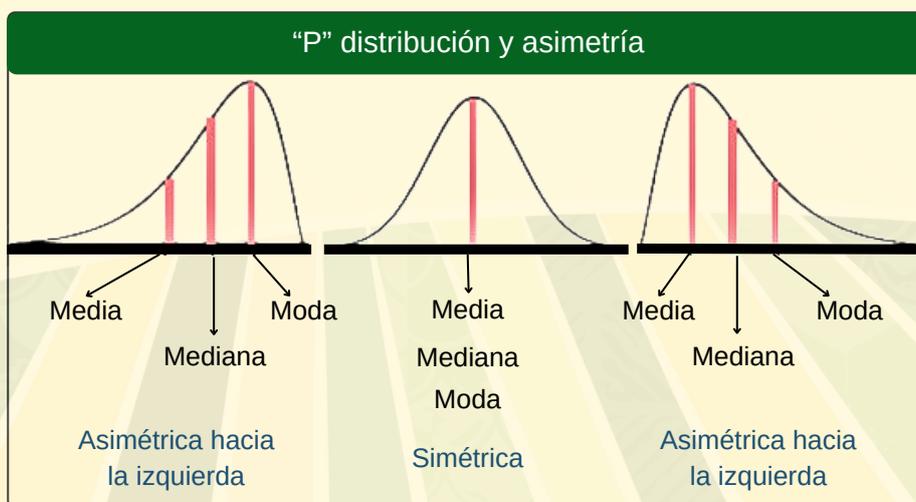


García, F.O., L.I. Picone y I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo, p. 229-264. En Echeverría, H.E. y F.O. García (eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da ed. INTA Ediciones, Buenos Aires. Argentina. 904 pp.

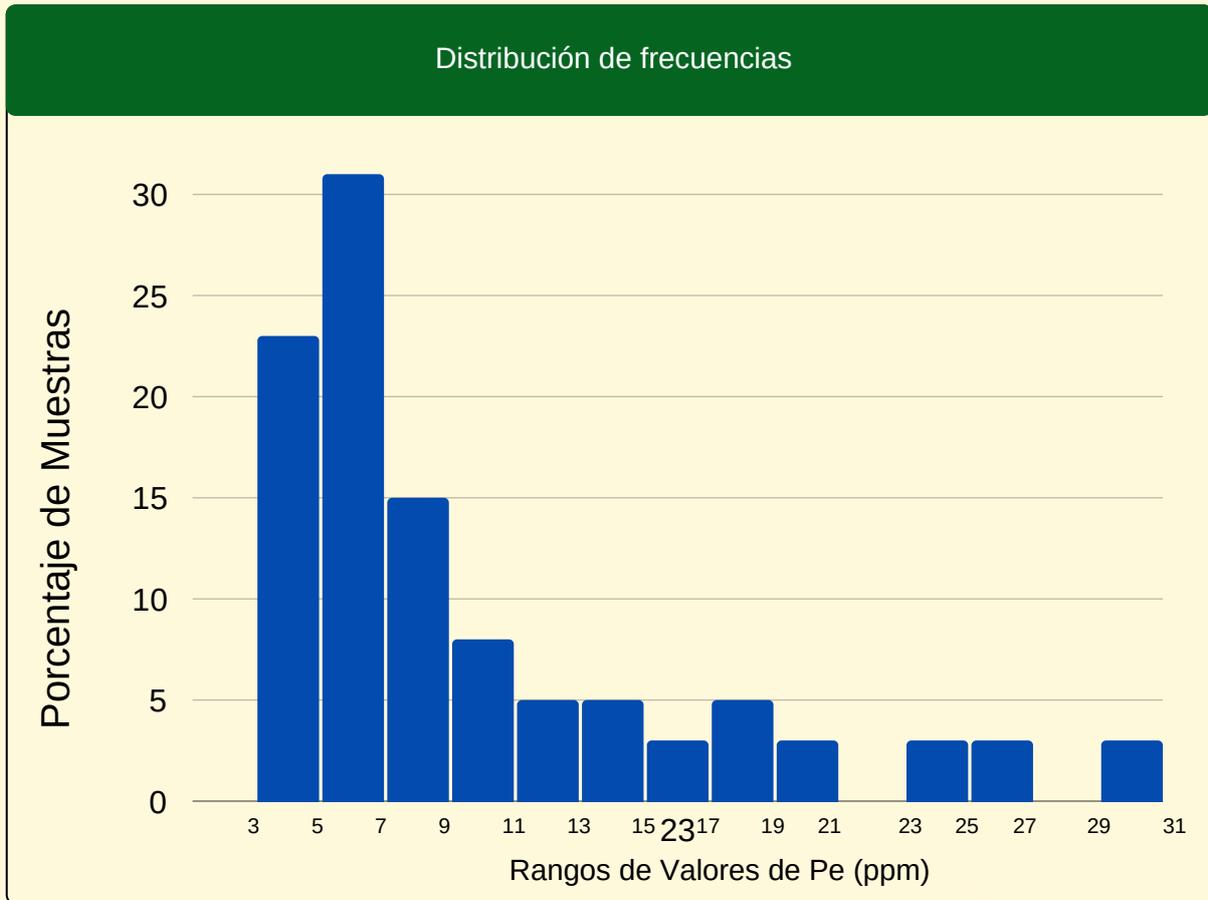
Al tomar muestras de suelos de los lotes esperaríamos una distribución normal en los niveles de fósforo. Sin embargo en pequeñas distancias los valores de fósforo extractable pueden diferir, y se suelen encontrar pocos valores con muy altos niveles de fósforo. En los sitios agrícolas estas asimetrías se profundizan, dado que el fósforo se aplica en general localizado, aumentando la heterogeneidad. Pocas muestras con valores muy altos alteran los valores de caracterización de los sitios, este sesgo puede corregirse en el muestreo con las siguientes medidas:

- Tomar gran cantidad de observaciones, con una cantidad de submuestras igual o mayores a 30 por muestra
- Evitar mezclar sectores con antecedentes de manejo diferente y reducir la variabilidad en la evaluación.
- Otra mejora consistiría en adoptar sistemas de manejo sitio-específico, que involucran en el caso de los nutrientes un muestreo y análisis inicial en grilla de alta intensidad.

Al tomar muestras de suelos de los lotes esperaríamos una distribución normal, es decir que haya la misma cantidad de valores más o menos repartidos por debajo y por encima del promedio o media aritmética. Sin embargo, aún en pequeñas distancias (menores al metro) los valores de fósforo extractable pueden diferir mostrando en general muchos valores de contenidos bajos, y muy pocos de altos contenidos, que elevan mucho la media, alejándola de los valores más frecuentes (representados por la mediana o la moda). En los sitios agrícolas estas asimetrías se profundizan, dado que el fósforo se aplica en general localizado, y al ser de baja movilidad quedan sitios con contenidos contrastantes de fósforo a distancias muy cercanas, especialmente en sistemas sin remoción (típicamente la siembra directa).



Distribución normal (izquierda) y asimétrica (derecha). Al tomar muestras de suelos de los lotes esperaríamos una distribución normal, es decir que haya la misma cantidad de valores más o menos repartidos por debajo y por encima del promedio o media aritmética. Sin embargo, aún en pequeñas distancias (menores al metro) los valores de fósforo extractable pueden diferir mostrando en general muchos valores de contenidos bajos, y muy pocos de altos contenidos, que elevan mucho la media, alejándola de los valores más frecuentes (representados por la mediana o la moda). En los sitios agrícolas estas asimetrías se profundizan, dado que el fósforo se aplica en general localizado, y al ser de baja movilidad quedan sitios con contenidos contrastantes de fósforo a distancias muy cercanas, especialmente en sistemas sin remoción (típicamente la siembra directa).



Pocas muestras con valores muy altos, “fuera de tipo” (valores a la derecha de los gráficos) alteran los valores de caracterización de los sitios, este sesgo puede intentar corregirse con las siguientes medidas:: Tomar gran cantidad de observaciones (“puntos de submuestreo”), igual o mayor a 30, para atenuar estos desvíos espaciales. Si se conocen los antecedentes del sitio, evitar mezclar sectores con antecedentes de manejo o condición edáfica diferente y reducir la variabilidad en la evaluación. Este tipo de muestreos se llaman dirigidos o en zonas: este considera mayor homogeneidad dentro de áreas (zonas) predeterminadas según condiciones de manejo asociadas a diferencia por tipos de suelos, topografía, productividad, antecedentes de manejo. Para estudios de largo plazo requiere el mantenimiento en el tiempo de la ubicación de la zonificación y del patrón de muestreo dentro de cada una. Otra mejora consistiría en adoptar sistemas de manejo sitio-específico, que involucran en el caso de los nutrientes un muestreo y análisis inicial en grilla de alta intensidad. Este tipo requiere alta intensidad de muestreo (aproximadamente 1 muestra/ha o aún más) siguiendo patrones aleatorios o regulares dentro de las grillas de evaluación.

