

EL FÓSFORO DEL SUELO

Ing. Agr. MSc. Agustín Sanzano

INTRODUCCIÓN

El fósforo es un elemento fundamental para la nutrición de las plantas. Es absorbido por éstas en forma de fosfatos mono y diácidos.

A diferencia del nitrógeno y del azufre, que son otros elementos que se absorben en forma aniónica, el fósforo es un elemento **poco móvil**. Por su tendencia a reaccionar dando formas fosforadas no disponibles para las plantas es que debe ser considerado uno de los elementos más críticos.

Aunque las plantas lo contienen en menor cantidad que el nitrógeno, potasio, y calcio, tiene como factor limitativo más importancia que el calcio y quizás más que el potasio. Es un elemento que da calidad y precocidad a las plantas, ya que adelanta la maduración, a diferencia del nitrógeno, que tiende a prolongar el crecimiento vegetativo. Cumple un rol plástico, porque se encuentra en toda la planta, y especialmente en los tejidos jóvenes y órganos de reserva. En los primeros interviene en la síntesis proteica y contribuye al desarrollo radicular. En los órganos de reserva (semillas y tubérculos) forma parte de fosfolípidos y ácidos nucleicos. También cumple un rol metabólico, ya que desempeña un papel indispensable como acumulador de energía y combustible para todas las actividades bioquímicas de las células vivientes al formar parte del adenosín trifosfato (ATP).

Además es muy importante en la alimentación del ganado, porque participa en la formación de los huesos y la leche (40 gr de P_2O_5 /100 gr de hueso; y 1 gr de P_2O_5 /lt de leche).

ORIGEN

La fuente original de fósforo es el material madre, constituido por rocas fosfatadas, tales como apatita, fluorapatita, vivianita, etc. Constituye aproximadamente el 0,12 % de la corteza terrestre.

La cantidad de fósforo total de la capa arable de un suelo agrícola (suma del fósforo orgánico e inorgánico) no está relacionada directamente con la disponibilidad.

FORMAS DE FÓSFORO EN EL SUELO

Desde el punto de vista del material que aporta el nutriente, separaremos al fósforo del suelo en dos grandes formas: fósforo orgánico y fósforo inorgánico.

FÓSFORO ORGÁNICO

La principal fuente está constituida por los residuos vegetales y animales que se adicionan al suelo. Los compuestos fosfatados más importantes de la materia orgánica son núcleoproteínas, fosfolípidos y fosfoazúcares.

La mineralización de la materia orgánica es lenta y por vía microbiana, requiriendo temperaturas de aproximadamente 25 a 30 °C, pH neutro y humedad cercana a ca-

pacidad de campo. El proceso de mineralización está regido por la relación C/P de la materia orgánica, cuyo valor crítico es aproximadamente 200. Por encima de este valor se produce depresión del fosfato inorgánico (fenómeno similar al de la depresión de los nitratos).

FÓSFORO INORGÁNICO

Desde el punto de vista edafológico interesa clasificarlo de acuerdo a su disponibilidad mediata o inmediata para las plantas en: fósforo soluble, intercambiable e insoluble.

Fósforo soluble: son las formas aprovechables para las plantas en forma inmediata, es decir son fosfatos en la solución del suelo. Su concentración es muy débil y fluctúa entre 0,2 y 0,5 mg/lt, o sea 200 a 400 gr/ha en 30 centímetros de espesor. En suelos muy ricos la concentración puede llegar hasta 1 mg/lt (1 ppm) y en suelos pobres a 0,1 mg/lt. Generalmente es una concentración constante y permanece así aunque varíe la relación suelo-agua.

Para que los cultivos se abastezcan convenientemente es necesario que ocurra una renovación del fósforo en solución. El equilibrio entre las distintas formas fosfatadas es lo que asegura la nutrición de los vegetales. Las formas solubles de fósforo en el suelo son los fosfatos diácidos ($H_2PO_4^-$) y monoácidos (HPO_4^{2-}). La concentración de los iones fosfatos en solución está relacionada con el pH de la misma. El ion $H_2PO_4^-$ es favorecido por los pH bajos, mientras que el ion HPO_4^{2-} por los pH más altos.

Fósforo intercambiable: es también llamado fósforo lábil o adsorbido, y su disponibilidad es más lenta que el anterior. La adsorción de fosfatos, como en general toda adsorción aniónica en el suelo, es un fenómeno que depende del pH. A pH ácidos aumentan las cargas positivas de los coloides y por ende, aumenta la adsorción. Estos iones forman parte del enjambre de iones que rodean a las partículas coloidales y están en constante movimiento.

Representan del 15 al 30% del fósforo inorgánico, lo que significa 800 a 2500 kg de P_2O_5 /ha.

Este fósforo lábil puede estar adsorbido directamente por los bordes de las arcillas (cuando están tienen cargas positivas como la caolinita a bajos valores de pH), o por uniones que usan al calcio como puente (en las arcillas de tipo 2:1). También puede estar adsorbido por los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, que tienen un poder de fijación mucho mayor que el de las arcillas.

Fósforo insoluble: es el que está formando parte de los minerales primarios y secundarios, y constituye la gran reserva de fósforo inorgánico en el suelo. La insolubilización se puede deber a la precipitación

como fosfatos cálcicos en medio alcalino, o como fosfatos de hierro y aluminio en medio ácido. Tanto en suelos ácidos como alcalinos, el fósforo tiende a sufrir una cadena de reacciones que producen compuestos fosforados de baja solubilidad. Por lo tanto, durante el largo tiempo que el fósforo permanece en el suelo, las formas menos solubles, y por ende las menos disponibles para la planta, tienden a aumentar. Cuando se agrega fósforo soluble al suelo, usualmente ocurre una rápida reacción (de unas pocas horas) que remueve el fósforo de la solución (fija el fósforo). Lentas reacciones posteriores continúan gradualmente reduciendo la solubilidad durante meses o años, según la edad de los compuestos fosfatados. El fósforo recientemente fijado puede ser débilmente soluble y de algún valor para las plantas. Con el tiempo, la solubilidad del fósforo fijado tiende a decrecer a niveles extremadamente bajos. Este fenómeno se conoce como envejecimiento del fósforo.

PÉRDIDAS Y GANANCIAS

Las principales vías de pérdida de fósforo del sistema suelo son: la remoción por la planta (5 a 60 kg/ha año en la biomasa cosechada), la erosión de las partículas de suelo que arrastran fósforo (0,1 a 10 kg/ha año en partículas minerales y orgánicas), y el fósforo disuelto en el agua de escurrimiento superficial (0,01 a 3 kg/ha año). Para cada una de estas formas de pérdida, las cifras más grandes de pérdida anual citadas podrían ser aplicadas a los suelos cultivados. Una vez que la tierra se incorpora al uso agrícola, las pérdidas de fósforo en las partículas de suelo erodado, en el agua de escurrimiento y en la biomasa removida por las cosechas, pueden ser sustanciales. En unos pocos años el sistema puede perder la mayor parte del fósforo reciclado entre las plantas y el suelo. El fósforo inorgánico remanente en el suelo no está disponible para las plantas. De este modo, la capacidad de reposición de fósforo en estos suelos perturbados comienza a bajar tan rápidamente que la recuperación de la vegetación natural es pobre, o en las tierras desmontadas para uso agrícola, muy pronto los cultivos disminuyen sus rendimientos.

La cantidad de fósforo que ingresa al suelo desde la atmósfera (adsorbido en las partículas de polvo) es muy pequeña (0,05 a 0,5 kg/ha año), pero puede balancearse con las pérdidas en los ecosistemas de bosques vírgenes o de pasturas naturales.

A diferencia de los compuestos nitrogenados producidos durante el ciclo del N (amonios, nitratos, etc.), el fósforo adicionado a los sistemas acuáticos desde el suelo no es tóxico para los peces, el ganado o los humanos. El crecimiento no deseado de algas y de malezas acuáticas, término llamado *eutrofización*, puede crear en los reservorios de agua dulce un ambiente insatisfactorio para los peces y puede hacer que el agua de bebida se torne no potable.

Por defecto o por exceso puede causar severos impactos negativos en la calidad ambiental. Los principales

problemas ambientales relacionados al fósforo del suelo son la degradación de tierras causada por la escasa cantidad de fósforo disponible y la eutrofización acelerada causada por el exceso del mismo. Ambos problemas están relacionados al rol del fósforo como un nutriente de la planta.

Hay probablemente 1 a 2 billones de tierras en el mundo en las que la deficiencia de fósforo limita el crecimiento de los cultivos y de la vegetación natural. La mayor parte de estas tierras se encuentran en países pobres, cuyos agricultores tienen poco dinero para fertilizantes. Sin un manejo apropiado de la fertilidad fosfórica, se puede esperar muy poca recuperación de la productividad de esas tierras, y por ende de la prosperidad de sus habitantes. Para detener y revertir este tipo de degradación de tierras se requerirá un buen manejo del ciclo del fósforo para hacer un uso eficiente de los escasos recursos.

DISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO PARA LAS PLANTAS

Es fósforo que se encuentra en el material madre es de baja asimilabilidad para las plantas. Probablemente todas las formas de fósforo sean asimilables luego de un largo período de tiempo. Si las plantas no toman los compuestos originales de fósforo, se hace necesario estudiar el comportamiento del mismo con relación a su asimilabilidad.

Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo, pero ésta tiene una concentración muy pequeña del nutriente como para satisfacer las necesidades de los vegetales durante el período de crecimiento. Por lo tanto el suelo debe ser capaz de hacer disponible una cantidad de fósforo varias veces mayor que la cantidad presente en la solución del suelo en un momento dado. Esto solamente es posible por la existencia de un equilibrio dinámico entre las diferentes formas de fósforo del suelo:

P insoluble *P lábil* *P soluble*

Una vez removido el fósforo de la solución del suelo, el resultado será una transferencia de fosfatos desde la fase sólida del suelo.

La relación entre fósforo en solución y fósforo fijado o lentamente soluble es un ejemplo del balance entre los factores capacidad e intensidad en la fertilidad del suelo. El factor intensidad es la cantidad de un nutriente disuelto en la solución del suelo. El factor capacidad es la cantidad del nutriente asociado con la matriz del suelo y en equilibrio con los iones del mismo nutriente en solución.

En los suelos se pueden dar las siguientes combinaciones:

- **Alta capacidad y baja intensidad:** se presenta en suelos ácidos o calcáreos ricos en fósforo, donde éste precipita como fosfato de hierro, aluminio o calcio.
- **Alta capacidad y alta intensidad:** se presenta en suelos neutros con buen contenido de arcilla y materia

orgánica, en donde el fósforo está adsorbido y es fácilmente intercambiable.

- **Baja capacidad y baja intensidad:** es típica de los suelos ácidos o calcáreos que además tienen materiales originarios pobres en fósforo.
- **Baja capacidad y alta intensidad:** se puede dar en suelos arenosos muy fertilizados y con pocos coloides o compuestos de hierro, aluminio o calcio que fijen el fósforo en forma de fosfatos insolubles.

FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO PARA LAS PLANTAS

- **Humedad:** las experiencias señalan que el movimiento del fósforo aumenta con el contenido de agua del suelo. Por otra parte la absorción de fósforo por las plantas aumenta cuando la succión matriz del suelo disminuye, lo que concuerda con el concepto de que la transferencia del nutriente a las raíces se efectúa por medio del agua.
- **Textura:** influye en la asimilabilidad del fósforo tanto por el contenido de agua que el suelo puede retener como por la contribución a la riqueza del fósforo del suelo. Los suelos de textura gruesa tienen menor contenido de agua que los de textura fina a cualquier succión matriz, y por lo tanto menor difusión del fósforo hacia la raíz. Por otra parte la cantidad de fósforo lábil o intercambiable será menor en los suelos de textura gruesa que los de textura fina que tienen mayor capacidad de adsorción de aniones.
- **Coloide inorgánico:** interesan el tipo y la cantidad de arcilla. Algunos minerales de arcilla son mucho más fijadores que otros. Generalmente aquellas arcillas que poseen gran capacidad de adsorción de aniones (debido a superficies cargadas positivamente), tienen una gran afinidad por los iones fosfato. Por ejemplo, una fijación extremadamente alta es característica de las arcillas alófanas, que se encuentran típicamente en los Andisoles y otros suelos asociados con cenizas volcánicas. Los óxidos de hierro y aluminio, tales como la gibbsite y la goetita, también pueden atraer y retener fuertemente los iones fósforo. Entre las arcillas silicatadas, la caolinita tiene la mayor capacidad de fijación de fósforo. Las arcillas de tipo 2:1 de los suelos menos meteorizados, tienen una relativamente pequeña capacidad de retener el fósforo.
- **Materia orgánica:** es fuente permanente de fósforo a través de los procesos de descomposición y mineralización que liberan nutrientes a la solución del suelo. La materia orgánica generalmente tiene poca capacidad para fijar fuertemente los iones fosfato. Los suelos ricos en materia orgánica, especialmente de fracciones activas de la misma, casi siempre exhiben relativamente bajos niveles de fijación de fósforo.
- **pH del suelo:** La mayor parte de la fijación de fósforo ocurre a muy bajos o muy altos valores de pH. Cuando el pH sube desde menos de 5 hasta 6, los fosfatos de hierro y aluminio se hacen algo menos solubles. Además cuando el pH cae desde más de 8 hasta menos de 6, los fosfatos de calcio incrementan su solubilidad. Por lo tanto, como regla general en los suelos minerales, la fijación de fosfatos es baja (y la disponibilidad para la planta es alta) cuando el pH se mantiene en el rango entre 6 y 7. Incluso en este rango de pH, la disponibilidad puede ser todavía muy baja, y los fosfatos solubles adicionados serán rápidamente fijados por el suelo. El bajo aprovechamiento por las plantas del fosfato agregado al suelo en una estación dada, es debido parcialmente a esta fijación. Un gran aprovechamiento deberá esperarse en los suelos orgánicos y en las mezclas preparadas de suelo, donde las concentraciones de calcio, hierro, y aluminio no son tan altas como en los suelos minerales.
- **Material original:** cuanto más rico es material original mayor será la disponibilidad de fósforo si las condiciones antes mencionadas no son limitantes.

ALGUNAS PRÁCTICAS QUE PERMITEN MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO

Debido a que la mayor parte de los suelos minerales tienen una gran capacidad para remover iones fosfato de la solución y fijarlos en la superficie de las partículas, se hace difícil para las raíces absorber una cantidad adecuada de fósforo para satisfacer las necesidades de las plantas. El fósforo en el fertilizante está también sujeto a la fijación en la superficie de las partículas, y probablemente solo un 10 -15% del fósforo agregado sea tomado por las plantas en el mismo año de la aplicación. En consecuencia, la disponibilidad de fósforo es un factor limitante en muchos agroecosistemas. Basándonos en los principios del comportamiento del fósforo del suelo, una serie de recomendaciones pueden sugerirse para mejorar el problema de la fertilidad fosfórica.

- **1. Manejo de las dosis del fertilizante fosfatado:** Si se puede agregar bastante fósforo, la capacidad de fijación del mismo puede saturarse, incluso en los suelos muy fijadores. Esta puede alcanzarse con una o dos dosis masivas de fósforo (usualmente como fertilizante fosfórico, roca fosfatada, o abono animal), o por la adición anual durante varios años de más cantidad de fósforo que la removida por la cosecha. La rápida o la lenta acumulación alcanzada podrá satisfacer la mayor parte de los sitios de fijación y llevará al suelo a niveles tan altos de fósforo que se mantendrá en solución suficiente cantidad del mismo, a pesar de la gran capacidad de fijación inicial. La aplicación de dosis masivas puede ser muy costosa, por lo que solo se utiliza en sistemas de agricultura intensiva. La

segunda desventaja para esta opción es la potencial contaminación del agua que se produce por la gran cantidad de fósforo liberado hacia el agua de escurrimiento en los suelos saturados con fósforo.

- **2. Ubicación del fertilizante fosfatado:** Para favorecer la absorción de fósforo por las raíces de las plantas se debe minimizar la oportunidad de reacción del mismo con el suelo. Generalmente, si el fertilizante es colocado directamente en la zona radicular, puede utilizarse un medio a un tercio del mismo, con respecto a una aplicación en donde se lo mezcle excesivamente con el suelo. El punto de ubicación es muy usado cuando la aplicación es manual, pero actualmente se está desarrollando maquinaria que "inyecta" el fertilizante para encontrar el punto de ubicación aún en los sistemas mecanizados. Las aplicaciones en banda constituyen prácticas comunes para la fertilización de arranque. Los árboles son usualmente fertilizados con pellets. En sistemas de siembra directa, se hace una banda superficial.
- **3. Combinación de fertilizantes amoniacales y fosfatados:** Si se usa amonio junto con el fertilizante fosfórico se produce un gran incremento en la absorción de fósforo por parte de la raíz, especialmente en los suelos alcalinos. Este aumento en la absorción está probablemente relacionado a los ácidos producidos durante los procesos de nitrificación y a los ácidos que producen las raíces cuando toman el nitrógeno en forma de amonio. Los fertilizantes de fosfato mono y diamónico ofrecen esta ventaja.
- **4. Adición de materia orgánica:** Además del fósforo orgánico provisto para la mineralización, la materia orgánica del suelo puede aumentar la disponibilidad de fósforo por reducción de la tendencia de la fracción mineral a fijar el nutriente. Esto se debe al enmascaramiento de los sitios de fijación por el humus, los ácidos orgánicos y los quelatos de hierro y aluminio. El

retorno de los residuos, incluyendo los abonos verdes en las rotaciones de cultivo, el mulching con varios materiales orgánicos, y la adición de abonos de origen animal y otros desechos descomponibles, pueden incrementar el fósforo disponible.

- **5. Control del pH del suelo:** Algún control sobre la solubilidad del fósforo puede lograrse manteniendo del pH del suelo entre 6 y 7. Este mantenimiento es generalmente más práctico en los suelos menos meteorizados que en aquellos más evolucionados de las regiones cálidas y húmedas. Un encalado oportuno puede contribuir para mejorar la disponibilidad de fósforo en muchos casos, pero si no existe material calizo disponible en la zona, el costo puede ser prohibitivo.

En resumen, la mayor parte de los suelos tiene una pequeña cantidad de fósforo disponible, la cual debe ser repuesta por una serie de procesos. El mantenimiento de suficiente fósforo disponible en un suelo es básicamente un programa doble:

- Adición de fertilizante fosfatado o de enmienda
- Algún grado de regulación de las propiedades de suelo que fijan tanto el fósforo adicionado como el nativo.

BIBLIOGRAFÍA

- **BRADY, N. and R. WEIL.** 1999. The Nature and Properties of Soils. 12th Edition. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- **CONTI, M.** 1998. Principios de Edafología. 1era Edición. FAUBA.
- **KHASAWNEH, F. E.** 1980. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc.
- **STEVENSON, F. J. and M. A. COLE.** 1999. Cycles of Soils. John Wiley & Sons, Inc.