

USO AGRONÓMICO DE LA ROCA FOSFÓRICA PARA APLICACIÓN DIRECTA

S.H. (Norman) Chien¹, Luis Prochnow² y Robert Mikkelsen³

Introducción

En muchos suelos ácidos del mundo, especialmente en los trópicos, los problemas de fertilidad limitan la producción de cultivos. Estos suelos tienen generalmente bajo contenido de fósforo (P) disponible para las plantas y a menudo tienen una alta capacidad de fijación de P, lo que resulta en una baja eficiencia de uso de los fertilizantes fosfóricos solubles en agua como el superfosfato triple (SFT) y el fosfato diamónico (DAP). En estos casos, la aplicación al suelo de roca fosfórica (RF) sin procesar puede ser una alternativa atractiva.

Propiedades de la roca fosfórica

El mejor indicador del desempeño agronómico de la RF es la solubilidad, característica que normalmente se mide en el laboratorio usando citrato de amonio neutro, ácido cítrico al 2 % o ácido fórmico al 2 %. La solubilidad de la RF refleja las características químicas y mineralógicas de minerales específicos. El principal mineral en la mayoría de las RF es la apatita, pero ésta varía ampliamente en sus propiedades físicas, químicas y cristalográficas.

La fórmula química de la apatita de algunas RFs representativas se presenta en la **Tabla 1**. En general, la solubilidad en citrato de amonio se incrementa a medida que aumenta la sustitución de CO_3^{2-} por PO_4^{3-} en la estructura de la apatita. Se conoce que la solubilidad de la RF correlaciona bien con la respuesta del cultivo (**Figura 1**).

Generalmente, la solubilidad de la RF se incrementa a medida que se reduce el tamaño de las partículas. Sin embargo, la efectividad agronómica de las RFs altamente reactivas molidas y sin moler no sigue estrictamente este patrón de comportamiento. Por ejemplo, la solubilidad de una RF reactiva sin moler (-35 mesh; 0.15 mm) es menor que la misma RF molida (-100 mesh; 0.15 mm), pero su efectividad agronómica es similar en condiciones de campo (Chien y Friese, 1992) e invernadero (**Fotos 1 y 2**). No es suficiente comparar la solubilidad y la efectividad agronómica de varias RFs basándose solamente en la distribución del tamaño de las partículas. Una base de datos sobre la solubilidad de muchas RFs de diversos sitios en el mundo fue compilada por Smalgerger et al. (2006).

Propiedades del suelo

pH: Entre las propiedades del suelo, el pH es el que tiene

la mayor influencia en la efectividad agronómica de la RF. Chien (2003) encontró, en un estudio conducido en 15 suelos de características diferentes, que la efectividad agronómica relativa (EAR) de la RF Gasa (Túnez), comparada con el SFT (EAR = 100 %) se incrementa a medida que el pH del suelo se reduce. Sin embargo, el pH por sí solo explica solamente el 56 % de la variabilidad de la EAR en este estudio (ecuación 1). Al considerar también el contenido de arcilla (factor relacionado con la capacidad amortiguadora del pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo) fue posible explicar el 74 % de la variabilidad de EAR (ecuación 2). Debido a que el pH se expresa en una escala logarítmica, la eficiencia agronómica de la RF se reduce apreciablemente a pHs superiores a 5.5. Por esta razón, el valor agronómico de la RF se reduce cuando el pH del suelo está por encima de este valor.

Ecuación 1:

$$\text{EAR, \%} = 181.4 - 21.1 \text{ pH} \quad (R^2 = 0.56)$$

Ecuación 2:

$$\text{EAR, \%} = 163.4 - 20.6 \text{ pH} + 0.78 \text{ arcilla} \quad (R^2 = 0.74)$$

Capacidad de fijación de P en el suelo: La liberación de P de la RF generalmente se incrementa con un mayor poder de fijación de P del suelo. La adsorción y la precipitación del P soluble crean un sumidero que reduce la

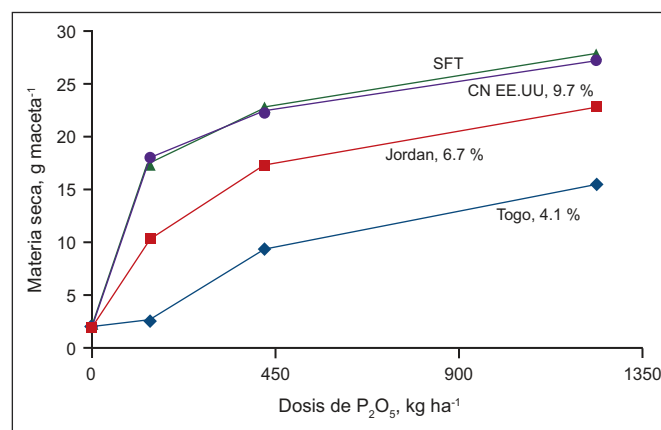


Figura 1. Materia seca de maíz fertilizado con RF molida de diferente solubilidad en citrato de amonio, comparada con una fuente de P soluble (SFT) en un suelo ácido (pH 4.8) (Chien y Friesen, 1992). La solubilidad en citrato de cada RF se muestra como porcentaje de P₂O₅.

¹ Consultor privado, anteriormente científico principal del IFDC, Muscle Shoals, Alabama, Estados Unidos. Correo electrónico: nchien@comcast.net.

² Director del Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI), Oficina para Brasil. Piracicaba, SP, Brasil. Correo electrónico: lprochnow@ipni.net.

³ Director del Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI), Oficina para el Oeste de los Estados Unidos. La Merced, California, Estados Unidos. Correo electrónico: rmikkelsen@ipni.net.



Foto 1. Respuesta de la soja a la aplicación de diferentes fuentes de P en Brasil.

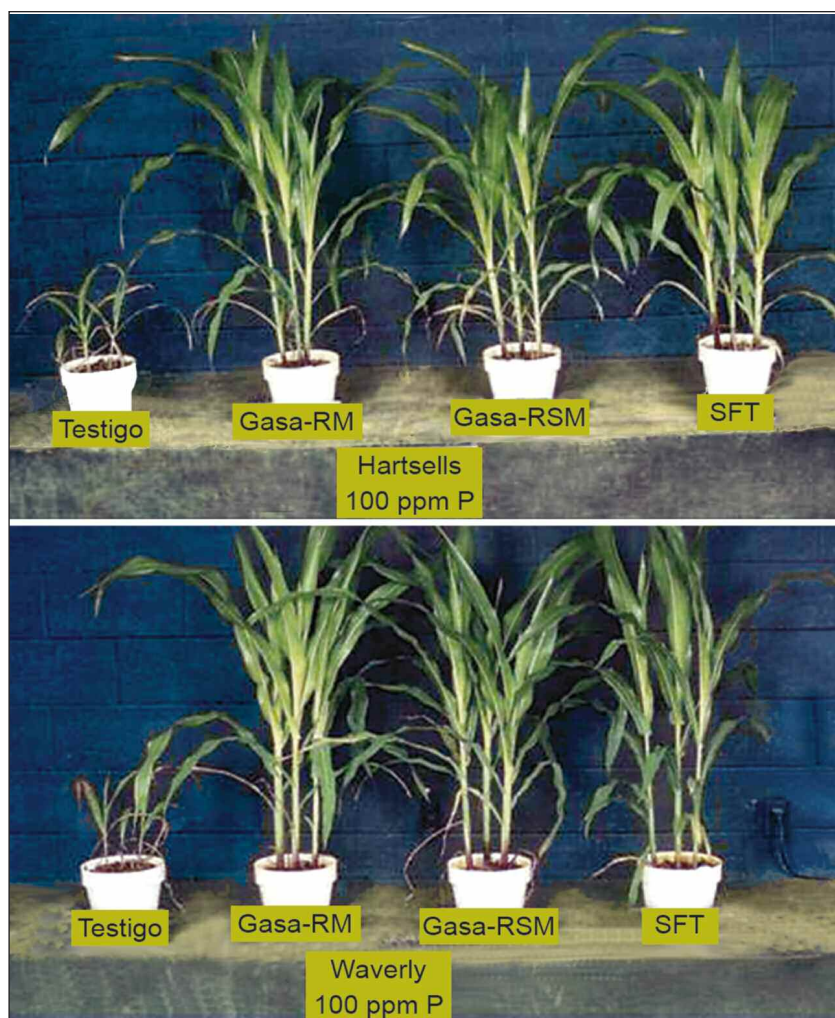


Foto 2. Comparación del efecto de la aplicación de RF molida (RM) y sin moler (RSM) en el crecimiento de maíz en dos suelos diferentes (Hartsells, pH 4.8 y Waverly, pH 5.3). Se compara en invernadero la RF de Gasa (Túnez) con SFT y un testigo sin fertilizar.

puede reducirse más rápidamente que en el caso de fuentes de P solubles. Por tanto, el efecto negativo de la capacidad de fijación en la EAR de la RF puede ser más significativo en los cultivos de corto plazo como las hortalizas. Para los cultivos a largo plazo o cultivos a corto plazo usando P residual, la EAR de la RF tiende a incrementarse, en comparación con las fuentes solubles con el incremento de la capacidad de fijación de P.

La **Figura 2** muestra que la EAR de varias RFs de diferente reactividad se incrementa desde el primer al tercer cultivo de frijol cultivado en un suelo de alta capacidad de fijación de P (Chien, 2003). Este comportamiento se debe a que el efecto residual del SFT se reduce rápidamente en suelos con alta capacidad de fijación y a la lenta disolución de la RF en el suelo.

Presencia de materia orgánica: Debido a que la disolución de la RF también libera calcio (Ca), en los suelos que inicialmente tienen un contenido alto de Ca la disolución de la RF es normalmente más lenta, como consecuencia de la ley de acción de masas. En muchos suelos tropicales el contenido de Ca es bajo y, por esta razón, presentan condiciones más favorables para la disolución de la RF. Por otro lado, se ha reportado el efecto positivo de la materia orgánica en el incremento de la efectividad de la RF (Chien, 2003). Se considera que el mecanismo para que la RF se disuelva mejor es la formación de complejos químicos entre la materia orgánica y el Ca.

Prácticas de manejo

La aplicación al voleo seguida de una incorporación con labranza es la forma más efectiva de agregar RF al suelo. Esta técnica maximiza la reacción de la RF con el suelo y minimiza la interacción entre las partículas de la roca. No se recomienda la aplicación en banda de RF porque esto limita el contacto de las partículas con el suelo y reduce la disolución. La efectividad de la RF también se reduce con la granulación de las partículas finas (Chien, 2003).

El manejo de la aplicación de RF para arroz de riego requiere de atención especial debido a que el pH se incrementa con la inundación. La efectividad agronómica de RFs reactivas

concentración del P en la solución del suelo y favorece la disolución de la RF. Sin embargo, a medida que se incrementa la capacidad de fijación, la concentración del P liberado al inicio del proceso de solubilización de la roca

puede reducirse drásticamente cuando se aplican al momento o después de la inundación, sin embargo, la RF puede trabajar bien si se aplica al suelo por lo menos dos semanas antes de la inundación (Chien, 2003). El añadir

cal a los suelos ácidos es una práctica común para elevar el pH y reducir la toxicidad del aluminio (Al). Sin embargo, el incremento de pH y el Ca adicionado con la cal afectan la disolución de la RF. Por esta razón, las prácticas de encalado deben balancear la necesidad de controlar la toxicidad de Al con la reducción de la disolución de la RF (Chien y Friesen, 1992). Se recomienda encalar para incrementar el pH del suelo hasta llegar a un rango entre 5.2 y 5.5 para de esta forma optimizar la efectividad agronómica de la RF.

Cultivos

La utilidad de la RF como fuente de P varía con el cultivo. En general, la efectividad de la RF es mayor en cultivos de largo plazo o perennes que en cultivos de corto plazo o anuales. La RF se ha usado extensivamente en muchos cultivos perennes como caucho, palma aceitera y té en Asia. La RF se ha usado también con éxito en pastos perennes.

La acidificación de la rizósfera es responsable de algunas

de las diferencias entre cultivos con respecto a la utilización de la RF. En un estudio que utilizó seis especies, Van Ray y Van Diest (1979) encontraron que la roca de Gasa (Túnez) era equivalente al SFT en trigo, cultivo que tuvo el pH más bajo en la rizósfera en comparación con las otras especies.

Se conoce que la canola es eficiente para utilizar la RF. Se considera que la exudación de ácidos orgánicos por la raíz contribuye a la disolución de la RF. Habib et al. (1999) reportaron que la canola era capaz de utilizar la roca de Ain Layloun (Syria), una roca de mediana reactividad, aun en suelos calcáreos. Subsecuentemente, Chien et al. (2003) encontraron que la EAR de nueve RFs utilizadas en canola sembrada en un suelo alcalino (pH 7.8) se incrementó de 0 a 88 % a medida que la solubilidad de la RF en ácido cítrico al 2 % se incrementaba de 2.1 a 13.1 % de P₂O₅ (Tabla 2).

Uso de la roca fosfórica en agricultura orgánica

La RF se utiliza en ocasiones en aplicación directa en

Tabla 1. Solubilidad y fórmula empírica de apatitas en algunas rocas fosfóricas sedimentarias.

Procedencia	P ₂ O ₅ , % (extraído con CAN*)	Fórmula empírica
Carolina del Norte, Estados Unidos	9.7	Ca _{9.53} Na _{0.34} Mg _{0.13} (PO ₄) _{4.77} (CO ₃) _{1.23} F _{2.49}
Gasa, Túnez	8.7	Ca _{9.54} Na _{0.32} Mg _{0.12} (PO ₄) _{4.84} (CO ₃) _{1.16} F _{2.46}
Bahía Inglesa, Chile	6.9	Ca _{9.59} Na _{0.30} Mg _{0.12} (PO ₄) _{4.90} (CO ₃) _{1.10} F _{2.44}
Florida Central, USA	5.3	Ca _{9.74} Na _{0.19} Mg _{0.07} (PO ₄) _{5.26} (CO ₃) _{0.74} F _{2.30}
Tennessee, USA	3.7	Ca _{9.85} Na _{0.11} Mg _{0.04} (PO ₄) _{5.54} (CO ₃) _{0.46} F _{2.18}
Patos de Minas, Brasil	2.5	Ca _{9.96} Na _{0.03} Mg _{0.01} (PO ₄) _{5.88} (CO ₃) _{0.12} F _{2.05}

* Citrato de amonio neutro (CAN)

Tabla 2. Características de las diferentes fuentes de P y su efectividad agronómica relativa (EAR) para canola cultivada en un suelo alcalino (pH 7.8) hasta la madurez (Chien et al., 2003).

Procedencia	Total P ₂ O ₅ ¹	Soluble en 2 %	Clases de reactividad ²	EAR, %
SFT	46.2	100	-	100
Gasa (Túnez)	30.1	13.1	Alta	88
Ain Laylou (Syria)	28.1	12.2	Media alta	82
Chelesai (Kazakhstan)	17.0	10.0	Media	74
Tilemsi (Mali)	26.2	10.3	Media	72
El-Hassa (Jordan)	31.3	9.0	Media	64
Kenegesepp (Russia)	29.9	7.8	Media baja	64
Kadjari (Burkina Faso)	25.3	6.0	Baja	60
Kaiyang (China)	32.4	5.1	Baja	42
Panda Hills (Tanzania)	24.8	2.1	Muy baja	0
Testigo	-	-	-	0

¹ Como porcentaje de P₂O₅ de la roca.
² Basado en la substitución CO₃/PO₄ en la estructura de apatita.

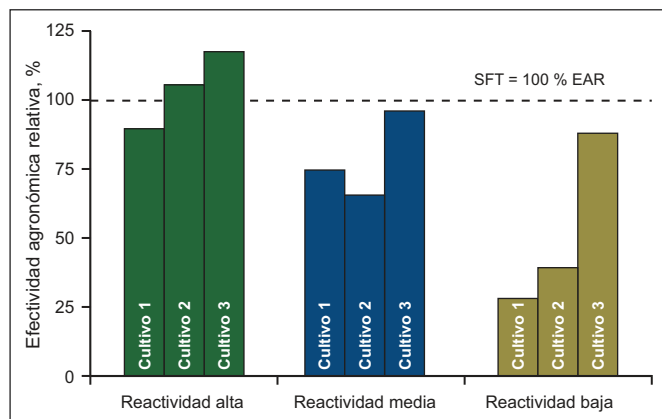


Figura 2. Efectividad agronómica relativa (EAR) de varias RFs (diferente solubilidad) en el rendimiento de tres cultivos sucesivos de frijol cultivados en un Andisol de Colombia (Chien, 2003). La EAR se calcula por comparación con el SFT. Todas las rocas se aplicaron una sola vez, en una dosis de 460 kg de P_2O_5 ha⁻¹.

agricultura orgánica. El éxito de la RF para la nutrición de los cultivos orgánicos depende en mucho de su reactividad en el suelo. El contenido total de P_2O_5 que aparece en el saco es irrelevante con respecto a la reactividad de la RF en el suelo. De hecho, la mayoría de las RFs de origen ígneo tienen un alto contenido de P_2O_5 (> 34 %), pero baja reactividad debido a la poca sustitución de CO_3 por PO_4 en la estructura de la apatita y, por esta razón, no son recomendadas para aplicación directa en agricultura orgánica (Chien et al, 2009). Sin embargo, los detalles de la reactividad de la roca rara vez se explican a los productores orgánicos. Los factores que afectan la efectividad de la RF en agricultura orgánica son más o menos los mismos que afectan el uso de RF en agricultura convencional. Una excepción ocurre cuando se añade RF en el proceso de compostaje, donde pueden presentarse condiciones alcalinas antes que condiciones ácidas (Chien et al., 2009), sin embargo, la quelatación del Ca derivado de la apatita por la materia orgánica puede ayudar a disolver la RF.

Sistemas de decisión y soporte para uso de roca fosfórica

Los resultados de muchos experimentos con RF se han integrado en una sola herramienta que permite predecir la efectividad agronómica de la roca en situaciones específicas. El Centro Internacional de Desarrollo de los

Fertilizantes (IFDC, por sus siglas en inglés) desarrolló y publicó un modelo de sistemas de soporte y decisión para RF (Smalberger et al., 2006; (<http://www-iswam.iaea.org>)). Este sistema puede usarse para tomar decisiones entre el uso de fertilizantes solubles o RF para satisfacer las necesidades de nutrientes. El sistema también provee asistencia para determinar las condiciones donde el uso de RF es más económico que los fosfatos solubles como fuente de nutrientes.

Conclusiones

En ciertas circunstancias, la efectividad agronómica y económica de la RF puede ser igual o mejor que la de los fertilizantes fosforados solubles en agua. A diferencia de los fertilizantes fosforados solubles en agua, que pueden ser usados ampliamente, existen factores específicos, incluyendo la reactividad de la RF, las propiedades del suelo, las prácticas de manejo y el tipo de cultivo, que deben tomarse en cuenta para maximizar la utilización de la RF. El uso de los sistemas de decisión y soporte es un medio efectivo de predecir el mejor uso de la RF.

Bibliografía

- Chien, S.H. 2003. Factors Affecting the Agronomic Effectiveness of Phosphate Rock for Direct Application. *In* Direct Application of Phosphate Rock and Related Technology: Latest. Development and Practical Experiences, pp. 50-62, (S.S.S. Rajan and S.H. Chien, ed.). Special Publications IFDC-SP-37, IFDC, Muscle Shoals, Alabama.
- Chien, S.H., and D.K. Friesen. 1992. Phosphate Rock for Direct Application. *In* Workshop on Future Directions for Agricultural Phosphorus Research, pp. 47-52, TVA Bull. Y-224. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama, U.S.A.
- Chien, S.H., G. Carmona, J. Henao, and L.I. Prochnow. 2003. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34:1825-1835.
- Chien, S.H., L.I. Prochnow, and H. Cantarella. 2009. *Adv. Agron.* 102:261-316.
- Habib, L., S.H. Chien, G. Carmona, and J. Henao. 1999. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30:449-456.
- Smalberger, S.A., U. Singh, S.H. Chien, J. Henao, and P.W. Wilkens. 2006. *Agron. J.* 98:471-483.
- Van Ray, B. and A. Van Diest. 1979. *Plant Soil* 51:577-589. ❖

