



Complejos organominerales para mitigar la deficiencia de hierro en suelos calcáreos

Juan Manuel Hernández Moreno¹
Gregorio Cadenas-Pliego²
Ricardo M. Tighe-Neira³
Yolanda González-García⁴
Antonio Juárez-Maldonado^{5,6*}

¹ Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo C.P. 25315, México.

² Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo C.P. 25294, México.

³ Departamento de Ciencias Agropecuarias y Acuícolas, Carrera de Agronomía, Universidad Católica de Temuco, Chile.

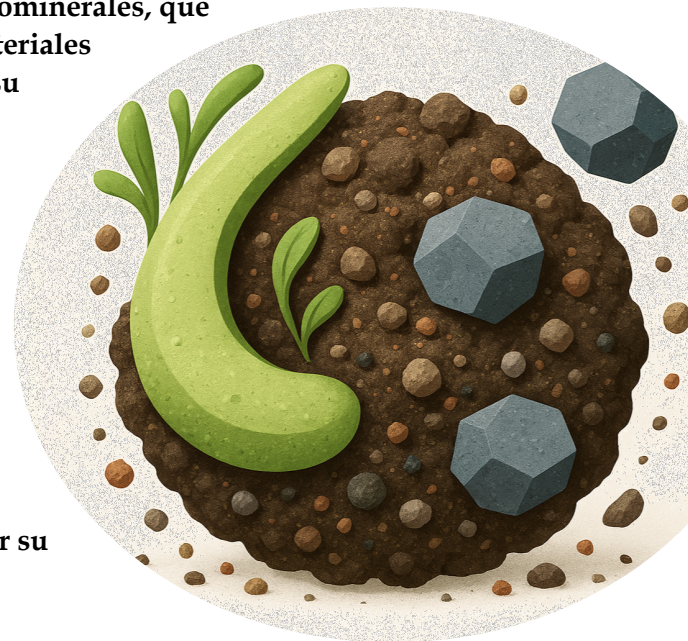
⁴ Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noroeste, Campo Experimental Todos Santos, La Paz C.P. 23070, México.

⁵ Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo C.P. 25315, México.

⁶ Laboratorio Nacional Conahcyt de Ecofisiología Vegetal y Seguridad Alimentaria (LANCEVSA), Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo C.P. 25315, México.

*Autor para correspondencia: antonio.juarez@uaaan.edu.mx

En los suelos calcáreos comunes del norte de México, el alto contenido de carbonatos y el pH alcalino dificultan que las plantas absorban hierro, provocando clorosis férrica y reduciendo el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Aunque los quelatos sintéticos se han utilizado para corregir este problema, suelen ser costosos y con efecto limitado. Una alternativa prometedora son los complejos organominerales, que combinan hierro con compuestos orgánicos. Estos materiales mantienen el hierro en formas más solubles y evitan su precipitación, además de favorecer la actividad microbiana y mejorar la salud del suelo. Una variante de la elaboración de los complejos es someterlos a un tratamiento térmico, el cual cambia la estructura del hierro y forma carbón pirofórico capaz de retener nutrientes y liberar el hierro de manera gradual y eficiente. Gracias a estas características, los complejos organominerales representan una opción económica y sostenible para mejorar la nutrición férrica en suelos calcáreos y apoyar una agricultura más productiva y amigable con el ambiente, sin embargo, aún se requiere investigación para optimizar su uso en diferentes condiciones de suelo.





Introducción

En general, los suelos calcáreos, también conocidos como calizos o calcícolas son predominantes en las zonas áridas y semiáridas del norte de México y representan un desafío importante para la agricultura. Estos suelos se caracterizan por un alto contenido de carbonatos de calcio (CaCO_3) como se muestra en la Figura 1, lo que les confiere un pH alcalino, generalmente superior a 7.5. Esta condición química limita la solubilidad y disponibilidad de diversos micronutrientes esenciales para las plantas, siendo el hierro (Fe) uno de los más afectados.



Figura 1. Perfil de suelo calcáreo donde se observa una costra superficial en la capa superior y una estructura endurecida en los estratos expuestos del perfil, ambas formadas por la acumulación de carbonatos de calcio.

El hierro, aunque se encuentra en abundancia en la corteza terrestre, permanece en formas químicas poco accesibles en los suelos calcáreos. La alta concentración de carbonatos provoca la precipitación del hierro ferroso (Fe^{2+}), que es la forma soluble y aprovechable por las raíces de las plantas, y lo convierte en compuestos férricos insolubles (Fe^{3+}), como se muestra en la Figura 2, los cuales no pueden ser absorbidos por la planta. Esta dinámica química genera una deficiencia nutricional de hierro. La deficiencia de hierro en las plantas se manifiesta principalmente en las hojas jóvenes, presentando un amarillamiento intervenal característico, conocido como clorosis férrica.



Este síntoma se debe a que el hierro participa en procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración celular, la síntesis de clorofila y la producción de enzimas antioxidantes. Al interrumpirse estas funciones, la planta reduce su capacidad de captar energía solar y su desarrollo vegetativo, lo que repercute directamente en su vigor y crecimiento. Como consecuencia, los cultivos establecidos en suelos calcáreos suelen presentar menores rendimientos y una pérdida significativa en la calidad de los productos cosechados. Esta limitación representa un reto para la producción agrícola en regiones donde los suelos calcáreos predominan, ya que la clorosis férrica afecta tanto a cultivos básicos como a cultivos hortícolas de alto valor comercial. Debido a esta problemática, se han desarrollado diversas estrategias de manejo agronómico para mejorar la disponibilidad de hierro en estos sistemas, tales como el uso de quelatos sintéticos, fertilización foliar y uso de complejos organominerales. No obstante, el manejo del hierro en suelos calcáreos continúa siendo un desafío, ya que las soluciones deben adaptarse a las condiciones edáficas, al tipo de cultivo y a la sostenibilidad de los sistemas productivos.

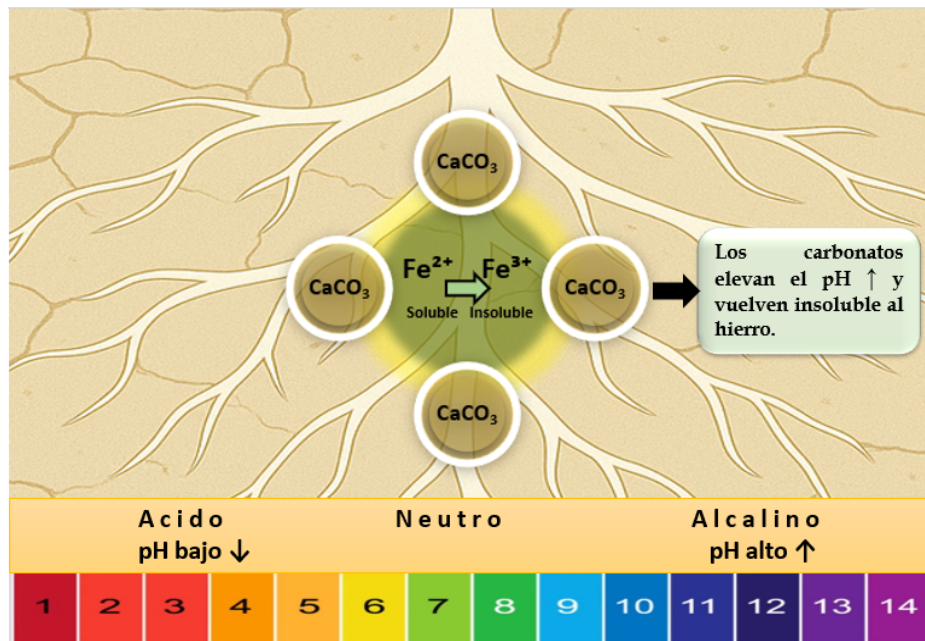


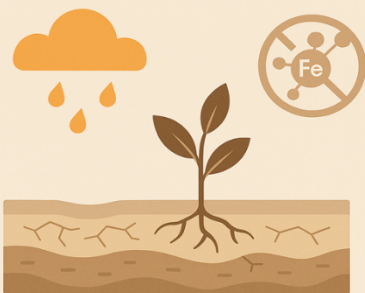
Figura 2. Se muestra cómo el hierro soluble en el suelo se vuelve insoluble al entrar en contacto con los carbonatos de calcio (CaCO_3), los cuales elevan el pH y reducen su disponibilidad para las raíces. Esto explica por qué, aun existiendo hierro en el suelo, las plantas pueden presentar clorosis férrica.



Complejos organominerales: una alternativa prometedora

Tradicionalmente, los productores han recurrido al uso de fertilizantes en forma de quelatos, principalmente EDTA (ácido etilen diamino tetra acético) y EDDHA (ácido etilen diamino-dio-hidroxifenil acético). Estos compuestos actúan como agentes secuestrantes que mantienen al hierro en una forma soluble y disponible para las plantas, evitando su precipitación en suelos calcáreos. Si bien su eficacia está comprobada, presentan algunas limitaciones: su alto costo, la necesidad de aplicaciones frecuentes y un efecto limitado en el tiempo, ya que la liberación de hierro no siempre es prolongada ni eficiente bajo condiciones extremas de alcalinidad. Frente a estas limitaciones, han surgido nuevas alternativas que buscan combinar eficacia, sostenibilidad y accesibilidad económica. Una de las más prometedoras es el uso de complejos organominerales, que han atraído la atención del sector agrícola en los últimos años. Estos complejos se plantean como una estrategia innovadora para enfrentar uno de los problemas más comunes en la agricultura de regiones áridas y semiáridas con suelos calcáreos, la precipitación del hierro debido al alto contenido de carbonatos. Esta condición del suelo limita la absorción del hierro, lo que genera deficiencias nutricionales visibles en los cultivos, manifestadas principalmente en la clorosis férrica.

La ventaja de los complejos organominerales radica en su mecanismo de acción combinado. A diferencia de los fertilizantes quelatados convencionales, estos complejos asocian al ion metálico, en este caso el hierro, con un compuesto orgánico como el ácido cítrico, la levadura o la goma arábica, como se muestra en la Figura 3. Estas sustancias no solo actúan como agentes protectores que evitan la precipitación del hierro al impedir que este entre en contacto directo con los carbonatos presentes en los suelos calcáreos, sino que también desempeñan un papel multifuncional en la dinámica del nutriente.



Estos complejos se plantean como una estrategia innovadora para enfrentar uno de los problemas más comunes en la agricultura de regiones áridas y semiáridas con suelos calcáreos, la precipitación del hierro debido al alto contenido de carbonatos.

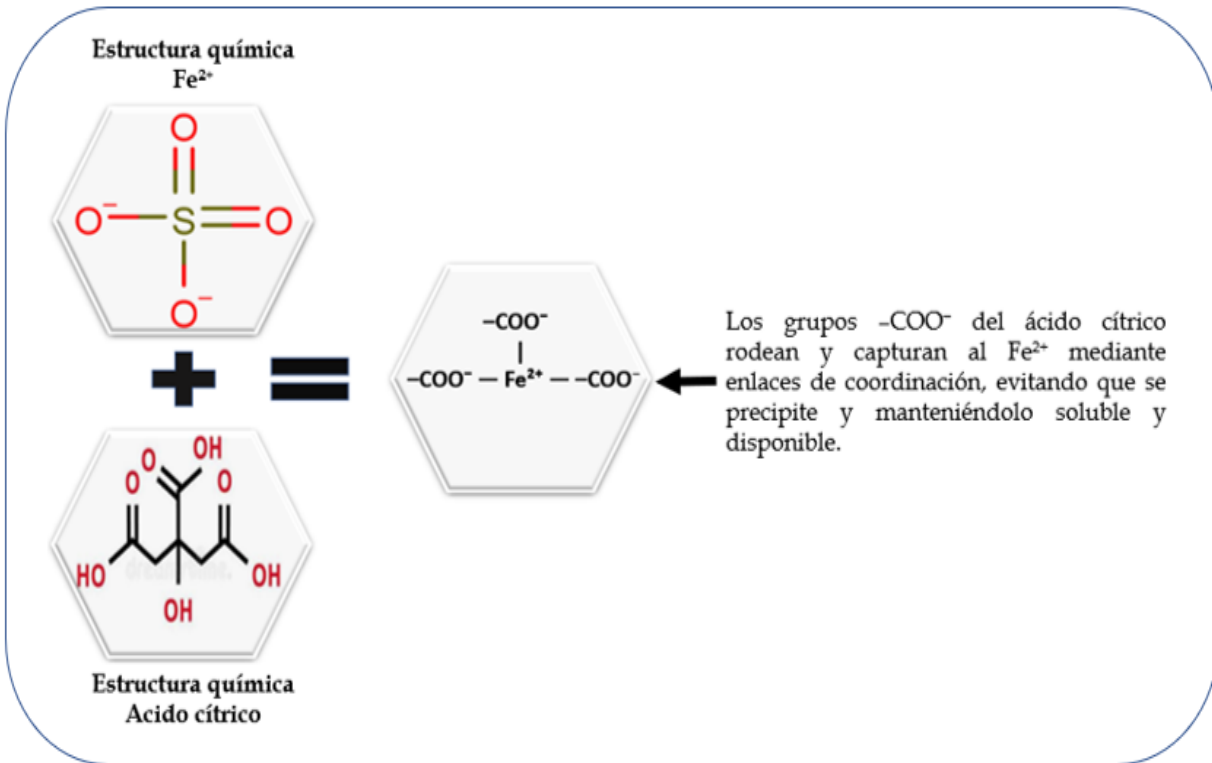
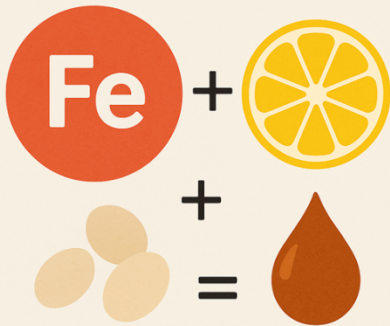


Figura 3. Interacción de las estructuras químicas de Fe^{2+} y el ácido cítrico, donde los grupos carboxilato ($-COO^-$) del ácido cítrico atrapan al hierro mediante quelación, manteniéndolo soluble y disponible para las plantas.

Por un lado, incrementan la solubilidad del hierro al mantenerlo en formas químicamente más estables y disponibles para la absorción radicular. Por otro lado, prolongan su permanencia en el suelo, lo que asegura un suministro más constante a lo largo del ciclo del cultivo y reduce las pérdidas por insolubilización o lixiviación, como se muestra en la Figura 4. Además, ciertos compuestos orgánicos empleados en estos complejos pueden estimular la actividad de comunidades microbianas beneficiosas. Esta interacción da lugar a una unión sinérgica entre el componente mineral y la matriz orgánica, en la que no solo se optimiza la eficiencia de la nutrición férrica, sino que también se generan efectos positivos adicionales en la salud del suelo y en el crecimiento de las plantas, resultando en cultivos más tolerantes y productivos bajo condiciones limitantes de disponibilidad de hierro.

Adicionalmente, el uso de compuestos orgánicos naturales confiere a los complejos organominerales un carácter más amigable con el ambiente, al reducir la dependencia de agentes sintéticos y promueve la sostenibilidad en los sistemas productivos.



Esta característica resulta particularmente importante en la agricultura moderna, donde existe una creciente demanda por tecnologías que equilibren la productividad con la conservación de los recursos naturales.

De esta forma, los complejos organominerales no solo representan una opción técnica para mejorar la disponibilidad de hierro en suelos calcáreos, sino también una oportunidad para avanzar hacia prácticas agrícolas más eficientes, económicas y sostenibles.

A diferencia de los fertilizantes quelatados convencionales, estos complejos asocian al ion metálico en este caso el hierro con un compuesto orgánico como el ácido cítrico, la levadura o la goma arábiga.

Principio de funcionamiento

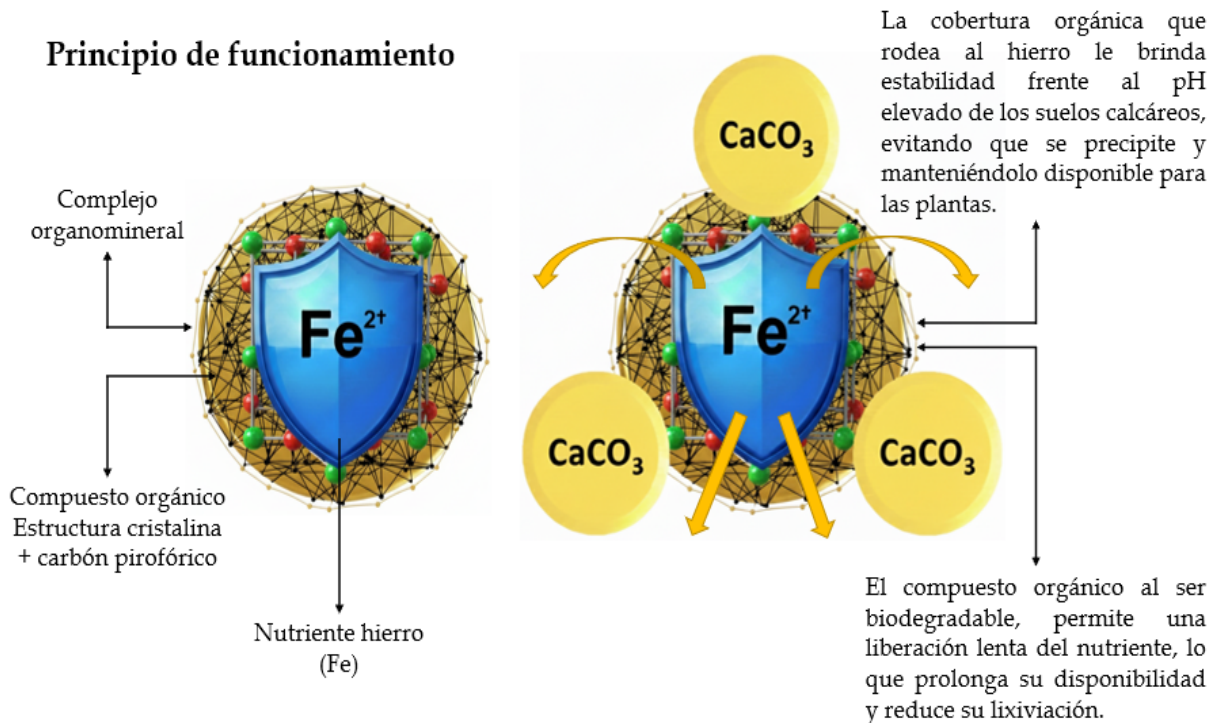


Figura 4. Papel del complejo organomineral como vehículo de entrega del hierro en suelos calcáreos.



¿Cómo se producen los complejos organominerales?

Los complejos organominerales se forman cuando el hierro se une a un compuesto orgánico que lo atrapa y lo mantiene disponible para la planta. Este proceso se conoce como síntesis de complejación, y consiste en mezclar una sal mineral de hierro con un compuesto orgánico que actúa como puente de unión. Para lograrlo, es importante controlar el pH y otras condiciones de reacción, de manera que el hierro quede bien fijado al compuesto orgánico.

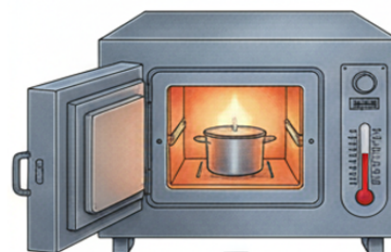
Otra de las etapas es el tratamiento térmico. Este procedimiento consiste en someter el material a temperaturas elevadas, alrededor de 600 °C, de manera controlada y durante un tiempo específico, como se muestra en la Figura 5. La finalidad no es únicamente eliminar la humedad residual y estabilizar la mezcla, sino también inducir una serie de reacciones físicas y químicas entre la matriz orgánica y el hierro. Estas transformaciones mejoran notablemente las propiedades del complejo final, tanto en términos de estabilidad como de funcionalidad en el suelo agrícola.

Durante el tratamiento térmico tienen lugar dos fenómenos clave que determinan las características finales del material:

1. Carbonización de la matriz orgánica. La fracción orgánica del complejo se somete a un proceso de **pirólisis**, es decir, descomposición térmica en ausencia parcial o total de oxígeno. En estas condiciones, la materia orgánica se transforma en un carbón altamente dividido y con una estructura rica en microporos, de acuerdo a la representación gráfica de la figura 6. El producto resultante se denomina **carbón pirofórico**, el cual posee:

- Una elevada **capacidad de adsorción** de nutrientes y agua, gracias a su área superficial específica.
- Grupos funcionales en su superficie que interactúan con el hierro, protegiéndolo frente a procesos de oxidación o precipitación.
- Un papel adicional como **vehículo protector**, actuando como una barrera que reduce la inactivación del hierro en contacto con los carbonatos presentes en suelos calcáreos.

Pirólisis a 600°C



Estructura amorfa

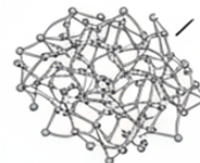


Figura 5. Proceso empleado para calentar el complejo a 600°C, en la parte inferior se observa la estructura amorfa del material antes de ser sometido al proceso de pirólisis.



Adicionalmente, el uso de compuestos orgánicos naturales confiere a los complejos organominerales un carácter más **amigable con el ambiente**, al reducir la dependencia de agentes sintéticos de síntesis química, y promueve la sostenibilidad en los sistemas productivos.

Este carbón pirofórico no solo asegura la permanencia del hierro en formas más estables, sino que también contribuye a mejorar la retención de humedad en el suelo, lo cual es un beneficio agronómico adicional en zonas áridas y semiáridas.

2. Cristalización del hierro. De manera paralela, el ion hierro sufre un proceso de **reordenamiento estructural**. A medida que la temperatura alcanza los 600 °C, los compuestos de hierro asociados al compuesto orgánico experimentan una transición hacia formas cristalinas más estables como se observa en la figura 6. Este cambio de una estructura amorfa a una cristalina implica:

- Mayor **estabilidad química**, que evita la precipitación rápida en contacto con carbonatos.
- Una liberación **gradual y controlada** del hierro, lo que prolonga su disponibilidad en la rizosfera.
- Propiedades **electroquímicas diferentes** que favorecen interacciones con compuestos exudados por las raíces y microorganismos benéficos del suelo.

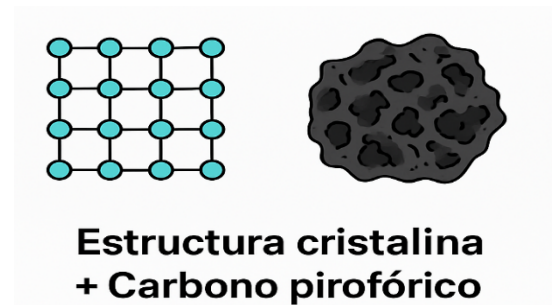


Figura 6. Como resultado del tratamiento térmico a 600°C, la fase amorfa asociada al hierro se reorganiza hacia una estructura cristalina, mientras que la fracción orgánica se carboniza y forma carbono pirofórico.



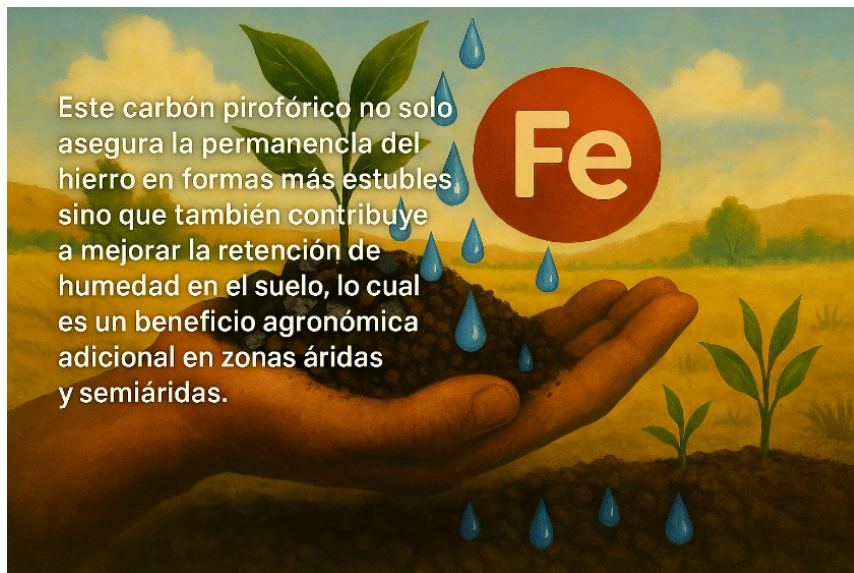
El resultado final de este proceso térmico es un complejo organomineral con propiedades únicas: combina la capacidad de retención y protección del carbón pirofórico con la estabilidad estructural del hierro cristalizado. Esta sinergia no solo aumenta la eficacia en la fertilización férrica de cultivos establecidos en suelos calcáreos, sino que también ofrece un enfoque más sostenible, al reducir la dependencia de quelatos sintéticos costosos y disminuir las pérdidas por lixiviación o precipitación.

Mirando hacia el futuro

En conclusión, el tratamiento térmico a 600 °C no debe considerarse un simple paso de secado, sino una etapa de transformación estratégica que otorga al complejo organomineral una arquitectura físico-química más eficiente para la agricultura moderna. Gracias a estas modificaciones, el uso de complejos organominerales de hierro tratados térmicamente se posiciona como una innovación prometedora para la fertilización de suelos problemáticos, como los calcáreos, donde la disponibilidad de nutrientes esenciales suele estar limitada por condiciones químicas adversas. Esta tecnología no solo busca aportar hierro como nutriente, sino diseñar sistemas inteligentes de liberación controlada capaces de interactuar con la biología del suelo y con los mecanismos naturales de absorción de las plantas.

El tratamiento térmico aplicado durante la elaboración de estos complejos permite generar carbón pirofórico como matriz, lo cual no solo mejora la estabilidad y la eficiencia del fertilizante, sino que también añade un valor agregado al contribuir a la mejora de la calidad del suelo y al secuestro de carbono.

De esta manera, los complejos organominerales trascienden la función de un simple fertilizante y se convierten en una herramienta de apoyo a prácticas agrícolas más sostenibles. Sin embargo, resulta necesario realizar estudios adicionales para conocer la tasa de liberación de estos nutrientes, ya que, algunas matrices empleadas pueden retardar su estabilidad en el suelo y en la entrega del fertilizante en relación a los tipos de suelo.






Conclusiones


En un contexto donde la agricultura enfrenta el reto de aumentar la productividad sin comprometer el medio ambiente, estos materiales emergen como aliados estratégicos para mantener la salud del suelo, garantizar cosechas más resilientes y reducir la dependencia de fertilizantes convencionales que presentan altas pérdidas por lixiviación o inmovilización. Su uso abre la puerta al diseño de fertilizantes más eficientes, de mayor durabilidad y con menor impacto ambiental.

En un futuro, la implementación de complejos organominerales de hierro tratados térmicamente podría significar una alternativa sostenible y de bajo costo para mejorar la productividad agrícola, fortalecer la seguridad alimentaria y contribuir a los compromisos globales de mitigación del cambio climático.

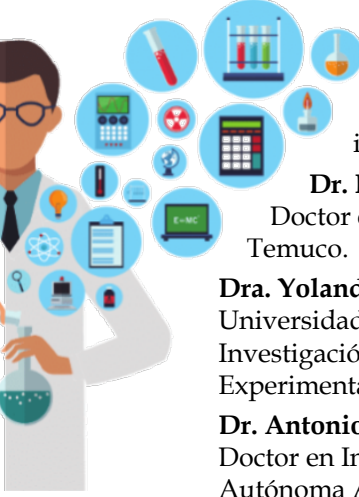


El resultado final es un complejo organomineral único que combina la capacidad de retención y protección del carbón pirofórico con la estabilidad estructural del hierro cristalizado.

Literatura recomendada

- 
- Alzate Zuluaga, M. Y., Cardarelli, M., Roupheal, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. 2023. **Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates.** *Scientia Horticulturae* 312: 111833. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111833>
 - Arcas, A., López-Rayó, S., Gárate, A., & Lucena, J. J. 2024. **A critical review of methodologies for evaluating iron fertilizers based on iron reduction and uptake by strategy I plants.** *Plants* 13(6): 819. <https://doi.org/10.3390/plants13060819>
 - Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. 2015. **Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture.** *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>

Semblanzas de autores



M.C. Juan Manuel Hernández Moreno. Maestría en Ciencias en Agroplasticultura, estudiante de doctorado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).

Dr. Gregorio Cadenas-Pliego. Doctorado en Química por el CINVESTAV-IPN, investigador titular "C" en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

Dr. Ricardo M. Tighe-Neira. Ingeniero Agrónomo por la Universidad Católica de Temuco, Doctor en Ciencias Agropecuarias y profesor investigador por la Universidad Católica de Temuco.

Dra. Yolanda González-García. Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, investigadora en el Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noroeste, Campo Experimental Todos Santos.

Dr. Antonio Juárez-Maldonado. Ingeniero Agrónomo por la Universidad Autónoma de Zacatecas, Doctor en Ingeniería de Sistemas de Producción y profesor investigador por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).