

## Bajando a la raíz del problema

Comencemos con una paradoja. Los síntomas de deficiencia de hierro en los cultivos son los más fáciles de identificar -básicamente clorosis férrica- pero al mismo tiempo y pese a las décadas de investigación en el tema, no todos los mecanismos de la nutrición con hierro en las plantas y los factores que afectan su disponibilidad en el suelo están completamente claros. Nuevos avances en estas materias fueron presentados durante el Simposio Internacional en Nutrición con Hierro y sus interacciones en la planta. El evento, que se realizó en Udine, Italia, en junio del 2002, reunió cerca de 150 investigadores de todas partes del mundo. Tratando de hacer un breve resumen de las ponencias uno podría decir "dejen de usar quelatos EDTA en el trabajo de investigación pero por favor sigan usándolos en el campo". Lógicamente que esta es una frase bastante provocativa. Al final de cuentas, y hasta que nuevas prácticas de manejo al igual que nuevos avances en bioquímica, genética molecular y estrategias de mejoramiento abran nuevas rutas prácticas para solucionar el problema de la nutrición con hierro, puede ser la recomendación más segura para los productores de todo el mundo.

El hierro es un elemento muy abundante en la corteza terrestre y muchos suelos contienen cantidades adecuadas de Fe total. La disolución y precipitación de óxidos de hierro, que están presentes en casi todos los suelos, es el principal factor que controla la solubilidad de Fe en los suelos. En pocas palabras, el Fe está presente en la mayoría de los suelos en cantidades adecuadas principalmente en forma férrica, pero la disponibilidad de Fe para el uso de la planta es restringido por interacciones que involucran a la planta y su ambiente. Hay un número de factores que favorecen la ocurrencia de la deficiencia de Fe: suelos pobres en hierro (muy raro), exceso de agua/ mal manejo del riego, alto contenido de fósforo, exceso de CO<sub>2</sub> (condiciones anaeróbicas), altas temperaturas, alta intensidad de la luz, daño de las raíces por pestes y enfermedades, alto contenido de NO<sub>3</sub>, pH alto, altos niveles de carbonatos, niveles muy altos de Zn, Mn, Cu, etc... Una lista no exhaustiva que es aumentada día a día por las nuevas investigaciones en genética y bioquímica.



Cualquiera sea la raíz del problema, la deficiencia de Fe está ahí afectando una importante cantidad de hectáreas de cultivos en todo el mundo. En suelos calcáreos/alcalinos donde se cultiva una parte significativa de los frutales y vides de Europa, se encuentran en casi todas partes deficiencias de Fe: en el valle de Ebro en España más del 90% de los huertos de duraznos y cerca del 70% de los huertos de peras sufren de clorosis férrica. Lo mismo pasa en el sur de Francia, en los huertos de peras y kiwis en el Valle del Po en Italia, en huertos de peras en Imathia en Grecia, etc... ¿A quién culpamos? Algunos dicen que son los productores al manejar mal sus huertos, otros culpan el "cultivo intensivo". La mayoría de los expertos en nutrición vegetal están de acuerdo que HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonato) es el principal factor que crea los problemas en suelos calcáreos. El bicarbonato previene que cantidades suficientes de hierro se integren a la solución del suelo, tiene un efecto directo en la translocación del Fe en la planta y un efecto indirecto en los mecanismos que la planta desarrolla naturalmente para responder al estrés férrico (Fe stress). ¿Cómo manejar la eficiencia del Fe en una forma práctica? Existen tres rutas principales: manejar la rizósfera y el pH del suelo; potenciar la disponibilidad de Fe en el suelo; incrementar la disponibilidad de Fe en la hoja.

## MANEJAR LA RIZÓSFERA Y EL PH DEL SUELO

"Con la excepción de mutantes y de especies de plantas no adaptadas- como las especies clacífolas- en general las plantas han desarrollado mecanismos eficientes para extraer el escaso Fe soluble disponible en la rizósfera. Estos mecanismos han sido bien caracterizados y estudiados a nivel genético y son conocidos como Estrategias I y II. Por lo tanto, la deficiencia de Fe no debería manifestarse en los predios de los agricultores, incluso en suelos calcáreos. Los problemas de clorosis en agricultura sencillamente indican un mal manejo de la planta o del suelo que se traducen en condiciones desfavorables en la rizósfera para la extracción de Fe. Una mejor consideración de los procesos de la rizósfera incluyendo las complejas actividades microbianas y una mejor estimulación o modelación de los procesos de la rizósfera a través de nuevas técnicas de fertilización y de medidas de manejo pueden ayudar a superar la clorosis en suelos calcáreos en una forma más natural y sustentable que los métodos convencionales como el uso de quelatos". La afirmación anterior fue parte de la lectura dada por el investigador alemán Prof. Volker Romheld durante las primeras charlas del Simposio de Udine. Para ilustrar estas ideas, se dio un ejemplo de un huerto de cítricos que paso de usar un amplio espectro de herbicidas a un sistema con mulch con coberturas vegetales ("specific grass species") entre los árboles con altas concentraciones en la hoja de inhibidores de la nitrificación, lo que resultó en un mejoramiento de las condiciones de Manganeseo en los cítricos debido a la acidificación de la rizósfera lo que derivó en una mayor resistencia a enfermedades. El propósito de este "demo" era sugerir que un manejo orgánico similar puede ser usado como remedio a la clorosis férrica a través de la explotación de la diversidad natural de las plantas. No hay duda de que este tipo de propuestas merecen una mayor consideración en el futuro. El número de compañías que ofrecen productos para el manejo de la rizósfera esta creciendo cada día y los productores son cada vez más receptivos a este tipo de productos. Pese a ello, un número de estos productos todavía deben probar su relación costo/beneficio a nivel de campo.

Aliviar los problemas de clorosis a través de la acidificación de toda la zona de raíces es la segunda opción pero no es práctica. Y, en cualquier caso, un descenso duradero del pH en suelos calcáreos es muy difícil de lograr. Más aún, la incorporación de un solo golpe de fuertes ácidos, al mismo tiempo que hace que el pH baje, potencia los problemas de

salinidad. El desarrollo del riego por goteo puede abrir una posibilidad de alimentar por goteo con ácidos y bajar en ciertos niveles el pH en la zona radicular, lo que puede ayudar a mejorar la nutrición con Fe. La otra forma de bajar el pH en el interfaz suelo/raíz puede ser incrementando la relación de absorción catión/anión, por ejemplo, usando sales de potasio. Finalmente, un mejor manejo de la fertilización nitrogenada también puede tener un impacto en este problema: como Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), que es ampliamente usada en suelos calcáreos y en fertirrigación, es conocida porque incrementa el pH, y por lo tanto afecta negativamente la disponibilidad de hierro. Bajando el pH en la rizósfera con fertilizantes basados en Amonio (con inhibidores de nitrificación incorporados) es una ruta que tiene sus puntos a favor pero que requiere de una cantidad total mayor de nitrógeno.

¿Qué pasa si se elimina la fertilización nitrogenada? Por supuesto que no en todos los cultivos, ¿pero por qué no en uvas? Un número importante de productores de uvas lo han hecho sin un impacto significativo en disminuir los problemas por deficiencia de hierro. Esto demuestra una vez más que el principal factor es el bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). En otras palabras, cambiar los patrones de aplicación de nitrógeno puede traer más problemas que beneficios.

## POTENCIAR LA DISPONIBILIDAD DE FIERRO EN EL SUELO

Incrementar la disponibilidad de hierro a nivel de raíces es la segunda opción para eliminar las deficiencias de hierro. ¿Pero cómo? Como regla  $\text{Fe}^{2+}$  es extraído preferentemente es comparación a  $\text{Fe}^{3+}$  pero esto depende de las diferentes especies de plantas. La mayor parte de Fe en los suelos alcalinos existe como  $\text{Fe}^{3+}$  en diferentes formas. El control de la solubilidad del hierro depende de los óxidos de hierro, cuya solubilidad es mínima en pH de entre 7.4 - 8.5 (valores comunes en suelos calcáreos).

Compuestos naturales de Fe con materia orgánica y agentes quelatantes naturales, que pueden ser encontrados en la solución suelo, incrementan notablemente la cantidad de hierro disponible para las plantas. Pero la estabilidad de estos agentes no es tan alta y varía mucho con las condiciones de pH.

El método más común utilizado para prevenir la deficiencia de hierro ha sido incorporar hierro adicional en una forma que sea extraída por la planta y al mismo tiempo estable. Se han ensayado muchas combinaciones de productos pero al final el tema se reduce a comparar la eficiencia y la relación costo/ beneficio entre las formas minerales y las orgánicas. Entre las formas minerales, que tienen la gran ventaja de ser más baratas, los sulfatos han tenido mayor éxito que los óxidos. El Sulfato ferroso aporta hierro en la forma  $\text{Fe}^{2+}$  pero existe el riesgo de que por lo menos una parte es oxidada a una forma no soluble y/o no es trasladada apropiadamente debido a la presencia de  $\text{HCO}_3^-$ . En otras palabras la aplicación al suelo de formas minerales solo entrega una eficacia relativa.

Investigaciones recientes en formas minerales alternativas como la vivianita (un fosfato natural presente como  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  que también puede ser sintetizado) indican que ese producto tiene un mejor efecto que las formas minerales clásicas y en algunos casos puede ser mejor que los quelatos. Se conoce poco todavía de las reacciones químicas responsables de hacer disponible el Fe de la vivianita para las plantas y se están realizando investigaciones en las universidades de Córdoba (España) y Bologna (Italia).

Mientras tanto, quelatos como EDDHA, EDDHMA y EDDHSA se mantienen como la forma más eficiente de aportar hierro adicional en la solución del suelo y estar seguros que el hierro es extraído y trasladado adecuadamente en la planta sin correr el riesgo de bloqueo o precipitación durante el proceso. Sin duda es lo más eficiente, pero ¿Son los de mejor costo/beneficio especialmente en cultivos de menor valor? El desafío de resolver esta ecuación queda planteado para los investigadores y la industria.

## AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE FIERRO EN LA HOJA



Esta tercera ruta fue poco explorada durante el Simposio de Udine. Pese a que las aplicaciones foliares no permiten llegar a la raíz del problema algunas veces es un sistema eficiente (y muchas veces más barato que aplicar al suelo) para solucionar un déficit de hierro. Qué producto aplicar sigue siendo un debate abierto: hay una afirmación bastante aceptada llamada la paradoja Fe-clorosis- que dice que las hojas con clorosis y las verdes tienen concentraciones de Fe similares. Esto sugiere que se pueden tener dos aproximaciones distintas para solucionar la clorosis en aplicaciones foliares: aplicar productos libres de hierro (ej., soluciones ácidas como ácidos cítrico/sulfúrico o un potente agente antioxidante como el ácido ascórbico o una auxina que active la "bomba de protones") que activen las reservas de hierro ("Fe pool") en la hoja clorótica; o aplicar compuestos de Fe (quelatos o fuentes alternativas). Así como la clásica y bien documentada superioridad del quelato DTPA sobre el quelato EDTA fue de nuevo enfatizada durante el Simposio de Udine (también ligado al hecho de que DTPA resiste mejor a la fotodegradación), uno tiene que remitirse a un congreso anterior para encontrar comparaciones interesantes entre las dos aproximaciones. Un trabajo de investigación conjunto entre equipos griegos, italianos y españoles en frutales de hoja caduca realizado hace 5 años indica que aplicar vía foliar "cítric/sulphuric, indole -3- acetic acid or ascorbic acid" genera un reverdecimiento significativo de la hoja, pero menos importante que al aplicar compuestos de Fe. Las investigaciones deben continuar para determinar si el efecto positivo logrado al aplicar productos sin hierro para "mover" el Fe en la hoja se debe

a, por ejemplo, su impacto en el pH del apoplasto, la tasa de oxidación del hierro en su forma ferrosa o la actividad de la reductasa férrica (Fe reductase).

En lo que respecta a los componente de Fe, también está documentado que el Sulfato de Fe puede ser tan eficiente como los quelatos en el efecto reverdecedor, especialmente cuando es asociado a, por ejemplo, ácido cítrico o a una mezcla de aminoácidos y polipéptidos (obtenido por hidrólisis de proteínas naturales). También tiene sus desventajas usar Sulfato de Fe: menos movilidad del hierro dentro de la planta, su incompatibilidad con algunos agroquímicos y el

riesgo de quemar hojas y de necrosis en la fruta, incluso a veces fitotoxicidad. En cualquier caso, el uso de productos basados en Sulfato de Fe requiere realizar más ensayos a en terreno a menores escalas que el uso de quelatos.

## DOS ESTRATEGIAS NATURALES PARA LOS CULTIVOS Y DOS ESTRATEGIAS PRÁCTICAS PARA LOS PRODUCTORES

Pese a que la forma inteligente de solucionar el problema, por lo menos en frutales, es probablemente la elección de porta injertos, esta ruta ha sido elegida pocas veces. La razón es que los porta injertos resistentes a la clorosis no son muy atractivos desde el punto de vista agronómico porque comúnmente inducen crecimiento excesivo del injerto. Basado en lo que escuchamos en Udine, la aproximación genética será probablemente exitosa en el largo plazo. Hasta entonces, los agricultores deberán confiar en medidas agronómicas. Incrementar la capacidad de las plantas para extraer hierro tendrá un gran impacto en la salud humana y vegetal. Las plantas tiene numerosas capacidades para movilizar, extraer y traslocar hierro. Históricamente estas capacidades han sido conocidas como bajo el rótulo de Estrategia I y II. La Estrategia I, aplicable a todos los cultivos salvo las gramíneas, consiste en incrementar la liberación de protón (H+) (disminuyendo el Ph) y la reducción de hierro de Fe 3+ a Fe 2+ ( de esta forma incrementando la solubilidad). La Estrategia II, aplicable sólo a gramíneas, consiste en el incremento en la producción de las plantas de phytosiderophores ( agentes quelatantes naturales) y establecer mecanismos para extraer Fe-phytosiderophores naturalmente sintetizados. La situación actual es que las prácticas intensivas de cultivo afectan la ocurrencia de estos mecanismos naturales mientras 3.000 millones de personas se ven afligidas por déficit de hierro y las plantas son la principal fuente de hierro en la mayoría de las dietas. Hasta que los investigadores aporten descubrimientos revolucionarios, a los agricultores solo les quedan dos estrategias:

Estrategia 1: aplicación de hierro foliar.

Estrategia 2: aplicación de hierro al suelo.

### ENTREVISTA

**Profesor Roberto Pinton**  
Chairman del Simposio de Udine

Asumo que Usted debe estar satisfecho don el número de delegados- cerca de 150- que asistieron al evento. Parece, eso sí, que no atrajo a muchas personas que tienen que ver con el trabajo agrícola de cada día. ¿ Significa esto que la gente tiene la impresión de que el tratamiento del déficit de hierro está bajo control?

Como chairman del comité organizador estoy satisfecho con el número de participantes, uno de los más altos desde la primera edición de este simposio en 1981, que provienen de 20 países. Se presentó un alto número de contribuciones ( 135) de altísimo nivel científico, que cubrieron todos los aspectos de la nutrición vegetal con Fe y que entregaron datos de muchos experimentos. Esta visión multidisciplinaria atrajo también a representantes de empresas ligadas a la nutrición vegetal con Fe quienes también presentaron sus trabajos experimentales. Esto implica inequívocamente que hay una necesidad creciente de transferir conocimiento científico a las prácticas en terreno.

El Simposio ha vuelto a demostrar que los quelatos de hierro generalmente son bastante eficientes en el tratamiento del déficit de hierro. También hemos escuchado que son considerados costosos pese a que su precio ha bajado en los últimos años. ¿Cree usted que el Simposio ha abierto nuevas rutas más económicas?

A nivel general se aprecia el beneficio del uso de quelatos de Fe sintéticos. Por otra parte como señaló uno de los expositores " Hay una demanda creciente por productos orgánicos con un uso reducido de agroquímicos". En este contexto es importante señalar que durante el Simposio se presentaron perspectivas muy interesantes que serán de utilidad para desarrollar nuevos métodos para el tratamiento y la prevención de la clorosis férrica como el uso de quelatos de Fe naturales y más eficientes.

Las estrategias de fitomejoramiento y de genética molecular para solucionar estos problemas pueden tener un impacto en el mediano plazo. Mientras tanto, los agricultores tiene que usar medidas agronómicas para solucionar el problema: potencial la disponibilidad de Fe en el suelo, manejar la rizósfera y el pH y aumentar la disponibilidad en la hoja. Un número considerable de "papers" afrontaron las dos primeras mientras que el aspecto de la hoja estuvo casi ausente. ¿ Significa esto que el tratamiento foliar es un caso perdido?

La genética molecular está ofreciendo valiosas herramientas para entender los mecanismos de adquisición y utilización de Fe en las plantas; el conocimiento en esta área está creciendo mucho y estamos a la espera de sus aplicaciones en el diagnóstico, fitomejoramiento y, posiblemente, en el manejo agronómico. Como quedó claro durante el Simposio, parece indudable que un buen manejo de las la rizósfera y de todo el sistema suelo-planta mejorará enormemente ka disponibilidad de Fe y la eficiencia en su uso, especialmente en frutales. Se necesita investigación básica y aplicada en este sentido, esto requerirá de un enfoque multidisciplinario y eco fisiológico que no ha sido aplicado mucho a la fecha. En este contexto, está claro que la nutrición foliar puede ser considerada como parte de este sistema complejo,



siempre y cuando se entiendan los mecanismos en el uso de Fe aplicado externamente y también Fe aplicado internamente ( el que proviene de las raíces u otros órganos de las plantas).

Volvamos a los quelatos. Uno de los posters más interesantes mostraba las metodologías para monitorear quelatos de hierro y predecir su comportamiento en la solución de nutrientes. Otro cubría la evaluación de productos comerciales. ¿ Cree usted que esos métodos son maduros y lo suficientemente confiables para transformarse en estándares europeos y, como tales, incluirlos en la legislación sobre el tema?

Como científico solo puedo decir que hay una necesidad de definir métodos comunes para monitorear quelatos. Por supuesto que este tema debe ser aproximado considerando las interacciones en el suelo y en la eficiencia del uso de la planta. De esta forma se podrán diseñar marcadores confiables también para evaluar productos comerciales. Por lo tanto, en mi opinión, metodologías como las que se presentaron en el Simposio pueden representar un buen punto de partida.

Una de las charlas sugirió que Fe y metales pesados como el cadmio interactúan desde la química del suelo a la fisiología de la planta y a la nutrición humana. En otras palabras, una planta que es deficitaria en cadmio absorbe más cadmio, el que sigue su camino por la cadena alimentaria. ¿ Están estas correlaciones claramente establecidas?

Las interacciones entre metales pesados en el suelo y en las plantas están claramente establecidas. Recientemente se ha probado que el Cadmio y el hierro pueden ser transportados a las células de las plantas a través del mismo mecanismo molecular. Pese a ello, se debe enfatizar que un número de factores pueden afectar la acumulación de metales en los tejidos de una planta en el sustrato suelo; por ejemplo, cuando un suelo calcáreo es lo suficientemente deficitario en Fe como para reducir la reducción y extracción de Fe en una planta dicotiledónea, también va a limitar la fitodisponibilidad de Cd. Por otra parte, el uso de productos adicionales enriquecidos con metales pesados puede alterar significativamente la relación entre los elementos, incluyendo los micronutrientes, dependiendo de las características del suelo, y de esta forma provocar acumulación selectiva de metales en los tejidos de las plantas. Por lo tanto, volvemos a la necesidad de una visión integrada del ecosistema de manera de enfrentar en forma racional el manejo de metales en el suelo y las aplicaciones de fertilizantes y de enmiendas.

Existen signos de que la industria y algunos centros de investigación están trabajando en el diseño de nuevas moléculas quelatantes que serán biodegradables y al mismo tiempo igual de eficientes que los quelatos sintéticos. En vista de que existe una creciente preocupación por la acumulación de quelatos en el suelo y en otras partes también se usan quelatos en procesos de limpieza industrial ¿Ve estos descubrimientos como un gran salto en el tema?

Definitivamente se necesitan alternativas a los quelatos sintéticos de Fe que sean más amigables con el medio ambiente. Por otra parte todavía es muy pobre el conocimiento sobre el destino de las moléculas quelatantes adicionadas al suelo en relación a los componentes quelatantes naturales ( originados en el suelo y las plantas). Es altamente necesario realizar mayor investigación en estos temas.

Este Simposio es el número 11 de su tipo. Están planificando organizar el N° 12 y si es así ¿dónde y cuando? Y más importante aún, ¿cuales cree Usted que deben ser los principales temas a abordar que se pueden transformar en acciones concretas para mejorar las prácticas agrícolas?

Tengo el placer de anunciar que el la próxima edición de este Simposio se desarrollará en Japón en el 2004. El chairman será el Prof. Satoshi Mori de la Universidad de Tokio. El presentó en Udine datos muy interesantes sobre la posibilidad de desarrollar estrategias de mejoramiento, también utilizando genética molecular, para mejorar la eficiencia de Fe en los cultivos. Esto aparece como una de las mejores premisas para esperar un programa científico atractivo. Debemos recordar que potenciar el contenido de Fe en las partes comestibles de las plantas es uno de los principales objetivos de la nutrición humana, y no solo en los países en desarrollo. Tenemos que integrar la investigación básica y aplicada en el programa científico del próximo Simposio.

En los últimos años, hemos dado importantes pasos para entender los equilibrios dinámicos del Fe en el suelo y las plantas. Actualmente necesitamos integrar este conocimiento para mejorar las prácticas agrícolas. Por esta razón, uno de los principales objetivos para los años venideros es transferir estos modelos a situaciones reales en terreno.

\* Este artículo fue publicado en la Revista New Ag International de Septiembre del 2002. El autor Jean Pierre Leymonie autorizó personalmente a Chileriego para que lo publicara. Fue traducido al castellano por Patricio Trebilcock K. Agradecemos las sugerencias a la traducción hechas por los investigadores de INIA La Platina, Dr. Rafael Ruiz y Dr. Gabriel Sellés.

Visite: [www.newaginternational.com](http://www.newaginternational.com)

Fuente: [www.chileriego.cl](http://www.chileriego.cl)