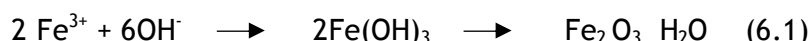


Agentes Quelantes:

(Extraído y adaptado por agroEstrategias consultores de Fisiología Vegetal - Frank B. Salisbury, Cleon W. Ross)

Los micronutrientes catiónicos hierro (y, en menor grado), zinc, manganeso y cobre, son relativamente insolubles en soluciones nutritivas si se suministran como sales inorgánicas comunes, y también lo son en la mayoría de los suelos. Esta insolubilidad es muy marcada si el pH es mayor a 5, como ocurre en casi todos los suelos del oeste de los Estados Unidos y muchas otras regiones con baja precipitación. En estas condiciones, los micronutrientes catiónicos reaccionan con iones hidroxilo hasta que se forma un precipitado de óxido metálico hidratado insoluble. En la reacción 6.1 se muestra un ejemplo en que la forma férrica del hierro precipita en un óxido de color café-rojizo (oxidado):



A causa de ésta y otras reacciones que contribuyen a su insolubilidad, estos micronutrientes deben ser mantenidos en solución por otros agentes. Un tipo importante de agente es el denominado ligando (o agente quelante). La reacción entre un ión metálico divalente o trivalente y un ligando da por resultado un quelato. Un quelato es el producto soluble que se forma cuando ciertos átomos de un ligando orgánico ceden electrones al catión. Los grupos carboxilo, de carga negativa, así como los átomos de nitrógeno, poseen electrones que pueden compartirse de esta forma. En suelos calcáreos (suelos ricos en Ca^{2+} y por lo general con pH de 7 o mayor), probablemente más del 90% del cobre y el manganeso, y el 50% ó más del zinc, se encuentran quelatados con compuestos orgánicos producidos por microbios, pero aún no se sabe cuáles son los ligandos.

La deficiencia de hierro, caracterizada por la falta de clorofila (clorosis), es un problema muy difundido a nivel mundial en suelos calcáreos y se le encuentra tanto en monocotiledóneas (sobre todo en pastos) como en dicotiledóneas. Con frecuencia este problema se resuelve o reduce agregando hierro al suelo o a las hojas en forma de un quelato comercial denominado Fe-EDDHA -ácido FE-etilendiamino di(o -hidroxifenil) acético-. Otro quelato de hierro es el Fe-EDTA, ácido Fe-etilendiaminotetraacético-, pero éste también quela fuertemente iones Ca^{+} , por lo que no es eficaz en suelos calcáreos.

Como la deficiencia de hierro es muy común, se ha puesto atención especial a los ligandos que mantienen disuelto este metal en los suelos y a las causas de que en ocasiones no lo hagan. En primer lugar, hay que entender que el Fe^{3+} es mucho menos soluble que el Fe^{2+} , por lo que, cuando un suelo está bien aireado, el Fe^{2+} no quelatado se oxida a Fe^{3+} , que a su vez se precipita como en la reacción 6.1. De las dos formas de hierro sin quelar, el Fe^{2+} se absorbe con mucha mayor facilidad por las raíces, por lo que la oxidación tiende a eliminar la forma disponible de Fe^{2+} (Lindsay, 1979). Al parecer son dos los principales tipos de ligandos que forman quelatos con el hierro e impiden que éste se precipite en su totalidad: los ligandos sintetizados por microorganismos y los que se sintetizan en las raíces. Estos últimos se excretan en el suelo circundante (la rizósfera). En cierto grado, la síntesis de ligandos por las raíces representa un sistema (o estrategia) de defensa contra la deficiencia de hierro, como se describe a continuación.

Parece que existen dos estrategias generales para la adquisición de hierro por las angiospermas (revisadas por Marschner et al., 1986; Romheld, 1987; Chaney, 1988; Brown y Jolley, 1988; Bienfait, 1988; Longnecker, 1988). Aún no se estudian en las gimnospermas. La estrategia I, presente en dicotiledóneas y algunas monocotiledóneas, implica la liberación de ligandos tipo fenol, como ácido caféico. Estos ligandos actúan sobre todo en iones Fe^{3+} ; tales iones quelados se movilizan hacia la superficie de la raíz, donde se reducen a Fe^{2+} cuando aún están quelados. Al mismo tiempo, las raíces de vegetales con la estrategia I y con un aporte reducido de hierro forman con mayor rapidez agentes reductores (NADPH) que realizan el proceso de reducción. La reducción hace que se pierda Fe^{2+} del ligando, y entonces este Fe^{2+} es absorbido de inmediato. Asimismo las plantas con la estrategia I y alguna deficiencia nutritiva liberan con mayor rapidez iones H^{+} que favorecen la solubilidad de ambas formas del hierro, en especial de Fe^{3+} . Esta estrategia a menudo está ausente en suelos calcáreos, debido a que el pH del suelo es muy elevado y se encuentra bien amortiguado con iones bicarbonato (HCO_3^-). Esta ausencia contribuye a la enfermedad fisiológica conocida como **clorosis inducida por cal** (Korcak, 1987; Mengel y Geurtzen, 1988).

Las plantas con la estrategia II, hasta donde se sabe, solo están representadas por pastos, incluyendo ciertos granos. Responden a la deficiencia de hierro formando y liberando ligandos poderosos que quelan iones Fe^{3+} de manera específica y muy eficaz. Estos ligandos se conocen como **sideróforos** (de la palabra griega que significa "portadores de hierro") ó, más específicamente **fitosideróforos** (Sugiera y Nomoto, 1984; Neilands y Leona, 1986). Los dos sideróforos más estudiados son el *ácido avénico* y el *ácido mugineico*. Ambos son ácidos

iminocarboxílicos que se unen a iones Fe^{3+} por medio de átomos de nitrógeno y oxígeno. Éstos y otros sideróforos se absorben cuando el hierro aún está en su interior, por lo que las raíces deben absorber los fitosideróforos y luego reducir a Fe^{2+} el hierro que éstos contienen. Es probable que el Fe^{2+} se libere y sea utilizado por la planta de inmediato, en tanto que el sideróforo puede ser después degradado químicamente o liberado de la raíz para transportar más hierro. Es factible que futuros cruces o manipulaciones de ingeniería genética con cereales lleguen a concentrarse en los genes que controlan la formación del sideróforo como un medio para mejorar la capacidad de los vegetales de crecer en suelos calcáreos.

Una vez absorbidos, los metales divalentes se mantienen solubles de manera parcial por quelación con ciertos ligandos celulares. Los aniones de ácidos orgánicos, en especial el ácido cítrico, parecen ser más importantes como ligandos para el transporte del hierro, zinc y manganeso a través del xilema, mientras que los aminoácidos parecen ser más importantes para el transporte de cobre (White et al., 1981; Mullins et al., 1986). A fin de cuentas, a las proteínas se une una gran cantidad de hierro, zinc y manganeso, níquel y cobre. De esta forma aceleran los procesos de transporte de electrones en la fotosíntesis y la respiración, a la vez que incrementan la actividad catalítica de las enzimas. Los cationes monovalentes como K^+ y Na^+ no forman quelatos estables, pero aún están débilmente asociados por atracciones iónicas tanto con aniones de ácidos orgánicos como de inorgánicos, inclusive proteínas.