

Clorosis Férrica en suelos calcáreos

(Ing. Agr. César Quintero. Resumen, traducción y adaptación del artículo de Konrad Menguel "Iron availability in plant tissues-iron chlorosis on calcareous soil. Nutrition in Soils and Plants. 389-397, 1995)

Introducción

La clorosis férrica de las plantas es un problema que afecta el desarrollo de los cultivos en suelos de elevado pH ó calcáreos. El síntoma característico es una clorosis internerval que afecta más a las hojas jóvenes que a las maduras. Siempre se ha sostenido que la deficiencia se produce por una baja disponibilidad de hierro en estos suelos, junto con una reducción en la absorción y translocación dentro de la planta. Sin embargo, el viejo problema de la clorosis en suelos calcáreos no es completamente entendido aún. La mayoría de los productos aplicados y las recomendaciones realizadas generalmente son caras y no siempre exitosas.

Movilidad del Fe en las raíces

La concentración de hierro en las raíces normalmente es superior a la de las hojas, lo que refleja en cierta medida la disponibilidad de hierro en el suelo. Diferentes investigaciones muestran que la acumulación de hierro en las raíces puede ser explicada por la acción de los fitosideróforos que movilizan hierro insoluble del suelo y lo transportan hacia las raíces. El quelato es descompuesto por los microorganismos liberando el hierro en la superficie de la raíz, el que probablemente es fuertemente adsorbido por la pared celular o precipitado en su mayoría en el apoplasto como $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Dado que las plantas cloróticas muestran una alta concentración de hierro en sus raíces, la clorosis podría estar relacionada a un problema de movilización y translocación del hierro a la parte superior de la planta. En una experiencia realizada por Menguel y Guerten (1988) se observó que plantas cloróticas de maíz se reverdecieron luego de tres días en que sus raíces fueran colocadas en una solución conteniendo amonio o en ácido clorhídrico diluido (pH 3,5). La concentración de hierro en las raíces declinó y se incrementó en la parte aérea (Tabla I).

Tabla I: Concentración de Fe y clorofila en plantas de maíz cloróticas luego de 72 hs de crecimiento en $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y HCl diluido.

Parte de la planta / Medio	NO_3^-	NH_4^+	HCl (pH 3,5)
Clorofila en hojas jóvenes (ng/g)	0,58	1,03	0,72
Fe en hojas (mg/kg)	100	163	157
Fe en tallos (mg/kg)	86	105	134
Fe en raíces (mg/kg)	588	414	398

La exposición de las raíces a un medio de amonio o de bajo pH inició la translocación del hierro de las raíces hacia las hojas. Este proceso implica la absorción del Fe por las células de las raíces, es decir el traspaso de la membrana plasmática. Hay suficiente evidencia de que este proceso de absorción empieza por la reducción del Fe^{3+} en la membrana, donde se encuentra la Fe^{3+} -reductasa, enzima cuya actividad es dependiente del pH. La máxima actividad de esta enzima se logra a pH 6,5, mientras que por encima de este valor su actividad declina drásticamente. La nutrición de las plantas en un medio rico en amonio provoca una disminución del pH de la rizósfera, es por ello que la nutrición nitrogenada es importante. Mientras que si la planta dispone de nitratos en un medio rico en bicarbonatos, como es común en suelos calcáreos, las raíces crecerán en un medio de elevado pH. El bicarbonato es particularmente abundante en las raíces de las plantas por la liberación de CO_2 y la disolución del CaCO_3 , siendo un fuerte buffer que neutraliza los protones liberados por las raíces.

Translocación del Fe y movilidad en las hojas

El mecanismo descrito antes parecería explicar porque se observa la clorosis férrica en los suelos calcáreos. La reducción del Fe^{3+} en la membrana plasmática de las raíces seguida de la absorción del Fe^{2+} parece ser el proceso crítico al que le sigue la oxidación en el simplasto, la acomplejación con citrato y la translocación vía xilema hacia la parte superior. Si esto fuera así, la concentración del hierro en las hojas se relacionaría estrechamente con la concentración de clorofila. Sin embargo, el hierro es el único elemento que no muestra una correlación entre la concentración en las hojas y el grado de deficiencia. En suelos calcáreos la concentración de hierro en hojas cloróticas puede ser similar e incluso superior a la encontrada en las hojas verdes, por lo tanto la deficiencia de hierro no es sólo un problema de absorción y translocación.

Existe suficiente evidencia para sostener que el bicarbonato puede incrementar significativamente el pH de la savia del xilema y alterar la translocación y distribución del hierro en las hojas. Los tejidos jóvenes, y particularmente el ápice de crecimiento, son abastecidos con hierro por vía floemática dado que los vasos del xilema se desarrollan más tarde. Los vasos del xilema que transportan Fe^{3+} -citrato proveniente de las raíces, pueden intercambiar con los del xilema. Este paso crucial implica el traspaso de la membrana plasmática y la reducción del hierro, que como ya se vio es afectado por el pH. Si este proceso de carga es afectado, el abastecimiento de hierro a los tejidos en crecimiento se verá limitado, y sólo llegará hierro por vía xilemática, por lo cual el patrón de distribución de hierro y clorofila sigue las nervaduras. El efecto se ve claramente en la Tabla II.

Tabla II: Efecto del Fe y el bicarbonato sobre la concentración de Fe y el crecimiento.

Tratamiento	pH del medio	Rendimiento g/planta	Hoja joven Fe (mg/kg)	Hoja vieja Fe (mg/kg)
Con Fe - Sin HCO_3^-	5,2	6,6	106	223
Sin Fe - Sin HCO_3^-	5,0	6	82	196
Con Fe - Con HCO_3^-	8,5	3,3	215	250

Se han reportado correlaciones negativas de 0,97 y 0,99 entre el pH de apoplasto de la hoja y la concentración de clorofila en soja y maíz, confirmando el efecto marcado del pH sobre la actividad de la Fe^{3+} -reductasa. Todos los trabajos indican que en medios ácidos la actividad de la enzima es muy superior, se ha encontrado que a pH 4 la tasa de reducción del hierro fue cinco veces más alta que a pH 8.

Por lo tanto, si la hipótesis de que el pH del apoplasto de las hojas es un factor crucial en la clorosis férrica de los suelos calcáreos, un simple tratamiento foliar con un ácido diluido debería solucionar el problema, probando que no es causado por una deficiencia absoluta de hierro. Existen algunas evidencias, como la presentada en la Tabla III, que ayudan a sostener este argumento.

Tabla III: Efecto de la aplicación foliar sobre la concentración de clorofila en hojas y rendimiento de arvejas en suelos calcáreos.

Tratamiento	Clorofila mg/g	Rendimiento kg/ha
Testigo	1,37	1.790
H_2SO_4	1,83	3.360
Fe-EDDHA	1,78	3.150

Conclusiones

El tratamiento de la clorosis férrica requiere del conocimiento de las reacciones biológicas que causan este problema en los suelos calcáreos. Como fue visto en este artículo, se trata de un problema fisiológico que está relacionado tanto en procesos en las raíces como en las hojas.

Aún en suelos calcáreos la disponibilidad del hierro es suficiente, debido a los numerosos sideróforos producidos por los microorganismos. El punto crítico del problema es la reducción del Fe^{3+} en el apoplasto de las raíces, por lo tanto la actividad de la enzima Fe^{3+} -reductasa y las condiciones que afectan su actividad son importantes. En consideración, el pH en el apoplasto y por lo tanto la bomba de protones localizada en el plasmalema son de suma importancia. Esto es válido no solamente para dicotiledóneas sino probablemente también para monocotiledóneas.

En muchos casos, suficiente hierro es translocado desde las raíces a las hojas y es la eficiencia del hierro foliar el que juega un rol crítico. Hay suficiente evidencia de que esta eficiencia está relacionada con el pH del apoplasto de las hojas y la actividad de la Fe^{3+} -reductasa localizada en las hojas. Se puede afirmar que su actividad es también pH dependiente y severamente deprimida por altos niveles de pH. Por lo tanto, también es este caso la bomba de protones es de suma importancia.