

TOXICIDAD DE HIERRO EN ARROZ*

Achim Dobermann y Thomas Fairhurst

Mecanismos

La toxicidad de hierro (Fe) es causada fundamentalmente por la elevada absorción de Fe, desde la solución del suelo, donde este metal se encuentra en altas concentraciones. Las plántulas de arroz recién transplantadas pueden afectarse cuando se acumulan cantidades altas de Fe inmediatamente después de la inundación. Más adelante en el ciclo de crecimiento, las plantas de arroz se ven afectadas por la excesiva absorción de Fe^{2+} , debido al incremento en la permeabilidad de la raíz y al aumento del cambio microbiano de Fe^{3+} a Fe^{2+} (reducción) en la rizosfera. La excesiva absorción de Fe incrementa la actividad de la polifenol oxidasa, lo que conduce a la producción de fenoles oxidados, proceso que causa el bronceamiento de las hojas. Una cantidad alta de Fe en las plantas puede incrementar la formación de radicales de oxígeno, los cuales son fitotóxicos y además responsables de la degradación de las proteínas y la peroxidación de los lípidos de la membrana celular.

La susceptibilidad a la toxicidad de Fe difiere de acuerdo a las variedades. Los principales mecanismos de adaptación que hacen que las plantas logren sobreponerse a los efectos de la toxicidad de Fe son los siguientes:

Evasión del estrés por medio de la oxidación de Fe^{2+} en la rizosfera

Precipitación del hidróxido de hierro III (Fe^{3+}) en la rizosfera de raíces sanas (evidenciada por una capa de color café rojizo que cubre las raíces) que previene la excesiva absorción de Fe^{2+} . Sin embargo, en suelos fuertemente reducidos que contienen cantidades altas de Fe, puede no existir suficiente oxígeno (O_2) para oxidar el Fe^{2+} . En estos casos, la absorción de Fe es excesiva y las raíces toman una coloración negra por la presencia de sulfuro de hierro. El poder de oxidación de las raíces incluye la excreción de O_2 por las raíces (transportado de la parte aérea a las raíces por el Parenquima) y la oxidación mediada por enzimas como la peroxidasa o la catalasa. Un inadecuado suplemento de nutrientes (K, Si, P, Ca y Mg) y cantidades excesivas de sustancias tóxicas (como el H_2S) reducen el poder de oxidación de las raíces.

Tolerancia al estrés de Fe

Tolerancia al estrés de Fe que puede deberse a la evasión o a la tolerancia de la planta a la acumulación de toxinas. Otro mecanismo es la retención de Fe en los tejidos de la raíz (oxidación de Fe^{2+} y la precipitación como Fe^{3+}).

La toxicidad de Fe está relacionada con el estrés causado por la deficiencia de varios nutrientes, situación que reduce el poder de oxidación de las raíces. Las raíces de las plantas deficientes en potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca) y/o magnesio (Mg) exudan más metabolitos de bajo peso molecular (azúcares solubles, amidas, aminoácidos) que las plantas con adecuado suplemento de estos nutrientes. Durante los períodos de intensa actividad metabólica (como al macollo), esta condición resulta en un aumento de la población de rizoflora, lo cual a su vez incrementa la demanda por receptores de electrones. Esto hace que las bacterias anaeróbicas (facultativas y obligadas) reduzcan el Fe^{3+} a Fe^{2+} . La continua reducción del Fe^{3+} contenido en la capa de óxido de hierro III (Fe_2O_3) que cubre las raíces puede paralizar la oxidación del Fe, resultando en un flujo incontrolado de Fe^{2+} hacia las raíces de la planta. Una mancha negra causada por la acumulación de H_2S se presenta en la superficie de las raíces. Esta es una clara indicación de condiciones de excesiva reducción y toxicidad de Fe.

Síntomas y efectos en el crecimiento

La toxicidad de Fe se caracteriza por la siguiente sintomatología: Presencia de pequeñas manchas de color pardo que aparecen primero en las puntas de las hojas viejas. Hojas enteras de color amarillo – anaranjado a pardo. Superficie de las raíces cubiertas por una capa de color negro.

Los síntomas aparecen primero 1-2 semanas después del transplante (algunas veces en más de 2 meses). Primero aparecen pequeñas manchas pardas en las hojas viejas que se inician en las puntas y que luego se esparcen hasta la base de la hoja. Luego estas manchas se combinan, la hoja toma un color anaranjado – parduzco y después muere. Las hojas superiores son delgadas pero a menudo permanecen verdes. Cuando la toxicidad de Fe es severa las hojas toman un color púrpura – parduzco. En algunas variedades, las puntas

* Tomado de: Dobermann, A., and T. Fairhurst. 2000. Rice: Nutrient disorders & Nutrient management. Potash and Phosphate Institute and International Rice Research Institute.

de las hojas presentan un color anaranjado – amarillento y se secan. Las plantas de arroz son más susceptibles a la toxicidad de Fe durante las primeras etapas del ciclo de crecimiento, cuando la capacidad de oxidación de las raíces es baja.

Otros efectos de la toxicidad de Fe son los siguientes:

1. Crecimiento lento y reducción significativa de los macollos.
2. Sistema radicular grueso y escaso, cubierto con una capa superficial de color pardo oscuro a negro (causadas por el H_2S) y presencia de abundantes raíces muertas. En contraste, las raíces saludables están cubiertas por una capa superficial uniforme de color pardo – anaranjado causado por la presencia de óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} .
3. Los síntomas de bronceado en las hojas pueden ser causados indirectamente por toxicidad de Fe, Mn y Al, resultando en deficiencia de P, K, Mg y Ca. Cuando las concentraciones de Fe, Mn y Al en la solución del suelo son altas, se limita el crecimiento de las raíces y éstas se cubren de una capa de óxidos de Fe^{2+} y Mn^{2+} . Esto reduce la capacidad de las raíces para absorber nutrientes.
4. La toxicidad de Fe podría estar combinada con deficiencia de Zn, cuando el bronceamiento es acompañado por un retardo en el crecimiento. El Fe compite con el Zn por los sitios de absorción y esto puede inducir la deficiencia de Zn. Sin embargo, la deficiencia de Zn es más probable en suelos alcalinos, mientras que la toxicidad de Fe ocurre en suelos ácidos a neutros con bajos contenidos de K disponible.

Condiciones de la planta

El contenido de Fe en las plantas afectadas es generalmente (pero no siempre) alto (300 – 2000 mg Fe/kg), pero el contenido crítico depende de la edad y el estado general de nutrición de la planta (Tabla 1). El nivel crítico es menor en suelos de baja fertilidad cuando éstos no han recibido nutrientes en forma balanceada.

Las plantas con toxicidad de Fe tienen un bajo contenido de K en las hojas (a menudo < 1%). Una relación Fe:K menor de 18:1 en la paja y menor de 1.5:1 en las raíces indica toxicidad de Fe.

Condiciones de suelo

Se puede decir que la concentración crítica de Fe en el suelo para que ocurra toxicidad es un contenido > 300 mg de Fe/kg. La concentración crítica de Fe en la solución del suelo para que ocurra toxicidad varía ampliamente. Se han reportado valores que van de 10 a 1000 mg Fe/litro. Esto implica que la toxicidad no está relacionada solamente con la concentración de Fe en la solución del suelo. Las diferencias entre las concentraciones críticas en la solución del suelo es causada por las diferencias en el potencial de las raíces de arroz para resistir los efectos de la toxicidad de Fe, que a su vez depende del estado fisiológico y de crecimiento del cultivo y la variedad (capacidad de oxidación de las raíces).



Foto 1. Los síntomas de la toxicidad de Fe se presentan inicialmente como pequeñas manchas pardas en la punta de la hoja que luego se mueven hacia la base.



Foto 2. Los síntomas de toxicidad de Fe aparecen primero en las hojas viejas.



Foto 3. Bajo severa toxicidad toda la hoja se afecta.



Foto 4. Bronceado en hojas de arroz deficiente en K, incapaces de mantener un suficiente poder de oxidación en las raíces (planta de la izquierda).

No se han establecido niveles críticos para contenidos de Fe en el suelo, sin embargo, suelos con pH <5.0 (en H₂O) son susceptibles a toxicidad de Fe. De igual manera, suelos que contienen cantidades bajas de K, P, Ca y Mg son también susceptibles.

Efecto de la inundación

La concentración de Fe²⁺ en la solución del suelo es controlada por la duración de la inundación, el pH y el contenido de materia orgánica y el de Fe. En la mayoría de los suelos minerales, la concentración de Fe²⁺ llega a su nivel más alto 2-4 semanas después de la inundación. En general, el Fe²⁺ en la solución se incrementa rápidamente después de la inundación, sin embargo, los valores máximos donde aparece la toxicidad van desde <20 mg

Fe/litro (en suelos calcáreos bajos en materia orgánica) hasta >1000 mg Fe/litro (en suelos ácidos). Una alta concentración de Fe²⁺ en el suelo puede retardar la absorción de K y P. Bajo condiciones de fuerte reducción, la producción de H₂S y FeS puede contribuir a la disminución del poder de oxidación de las raíces.

La oxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺ debido a la liberación de O₂ por las raíces, acidifica la rizosfera (importante para la absorción de P) y promueve la formación de la capa de color parduzco sobre las raíces.

Causas

Las principales causas de la toxicidad de Fe son las siguientes:

1. Concentraciones altas de Fe²⁺ en la solución del suelo debido a condiciones fuertemente reductoras y/o bajo pH.
2. Estado nutricional del cultivo pobre y desbalanceado. La deficiencia de P, Ca, Mg y K produce una baja oxidación y disminuye el poder de exclusión de Fe²⁺ de las raíces. La deficiencia de K es a menudo asociada con un bajo contenido de bases y bajo pH, condiciones que están asociadas a su vez con una alta concentración de Fe en la solución del suelo.
3. Pobre poder de oxidación radicular (exclusión de Fe²⁺), debido a la acumulación en la rizosfera de sustancias como H₂S, FeS y ácidos orgánicos, que inhiben la respiración.

4. Aplicación de altas cantidades de residuos orgánicos sin descomponer.
5. Suplemento continuo de Fe al suelo con el agua subterránea o por filtración lateral de sitios adyacentes.
6. Aplicación de desechos urbanos o industriales con alto contenido de Fe.

Ocurrencia

La toxicidad de Fe se presenta en un amplio rango de suelos, pero generalmente ocurre en suelos que tienen inundación constante durante el ciclo de crecimiento. Características comunes de los sitios donde se presenta la toxicidad son mal drenaje, baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bajo contenido de macronutrientes. Sin embargo, la toxicidad de Fe ocurre en un amplio rango de pH (4-7). Los suelos susceptibles a la toxicidad de Fe son los siguientes:

1. Suelos pobremente drenados (Aquepts, Aquepts, Aquults) en valles bajos que reciben el flujo de suelos ácidos más altos.
2. Suelos caoliníticos de baja CIC y bajo contenido de P y K.
3. Suelos aluviales o coluviales ácidos y arcillosos.
4. Suelos sulfato ácidos jóvenes.
5. Suelos ácidos de zonas bajas y suelos de turba de zonas altas.

Tabla 1. Rango óptimo y nivel crítico para que ocurra toxicidad de Fe.

Estado de crecimiento	Parte de la planta	Optimo	Nivel crítico para toxicidad
		----- mg/kg -----	
Macollo al inicio de la planta	Hoja bandera	100-150	>300-500

Estrategias de manejo para prevenir la toxicidad de Fe

En general, las medidas que previenen la toxicidad de Fe son las siguientes:

1. **Variedades:** Utilizar variedades tolerantes a la toxicidad de Fe (IR8192-200, IR 9764-45). Si se suplementan nutrientes en cantidades suficientes, los híbridos de arroz forman un sistema radicular más vigoroso, con un mayor poder de oxidación, que tiende a absorber cantidades bajas de Fe en suelos donde se puede desarrollar toxicidad de Fe.
2. **Tratamiento de la semilla:** En climas templados, donde se siembra directamente la semilla, se recomienda cubrir la semilla con oxidantes (peróxido de calcio al 50-100% de base al peso de la semilla) para mejorar la germinación y la emergencia de la plántula, al incrementarse el suplemento de O₂.
3. **Manejo del cultivo:** Es aconsejable retrasar la siembra hasta que el pico de alta concentración de Fe²⁺ haya pasado (no menos de 10-20 días después de la inundación).
4. **Manejo del agua:** Se debe usar riego intermitente y evitar la inundación permanente en suelos pobremente drenados que contienen cantidades altas de Fe y materia orgánica.
5. **Manejo de los fertilizantes:** Utilizar una nutrición balanceada (NPK o NPK + cal) para evitar el estrés

de nutrientes. Aplicar suficiente K y encalar los suelos ácidos. No se debe aplicar cantidades excesivas de materiales orgánicos (residuos de corral, paja) en suelos que contienen cantidades altas de Fe y materia orgánica o donde el drenaje es malo. Se debe utilizar urea (menos acidificante) antes que sulfato de amonio.

6. **Manejo del suelo:** Se debe arar el suelo seco en el período de descanso después de la cosecha para incrementar la oxidación del Fe. Esto reduce la acumulación de Fe²⁺ durante el subsecuente período de inundación.

Tratamiento de la toxicidad de Fe

Se deben seguir las medidas preventivas porque el tratamiento de la toxicidad de Fe durante el crecimiento del cultivo es difícil. Algunos tratamientos opcionales se presentan a continuación:

1. Aplicar K, P y Mg adicionales.
2. Incorporar cal en suelos ácidos para elevar el pH.
3. Incorporar 100-200 kg de MnO₂/ha para disminuir la reducción del Fe³⁺.
4. Remover el agua de inundación en la mitad del ciclo para sacar el Fe²⁺ acumulado. Se debe también drenar el suelo en la mitad del período de macollamiento, y se lo debe mantener libre de agua (pero húmedo) alrededor de 7-10 días, para mejorar el suplemento de O₂ durante este período.-