

# **La vida en nuestro planeta, no sólo una cuestión de Fe**

**Carlos Lucena León**

**Departamento de Agronomía, Unidad de Fisiología Vegetal. Universidad de Córdoba**



## INTRODUCCIÓN

Hierro (Fe) y fósforo (P) son dos elementos esenciales para el crecimiento de las plantas. Ambos elementos participan en procesos tan importantes para las plantas que, sin su presencia, la vida en nuestro planeta sería muy diferente a como la conocemos actualmente. Además, la deficiencia de estos dos elementos en los cultivos actuales, genera dos problemas agronómicos de gran importancia que tienen implicaciones ambientales y económicas de enormes dimensiones en la agricultura actual.

Las funciones que desempeña el hierro en la planta están relacionadas con su capacidad para transferir electrones de forma reversible, siendo un elemento indispensable para la síntesis de clorofila, que es el pigmento verde que permite que se pueda llevar a cabo la fotosíntesis. Sería imposible concebir la vida en la superficie de nuestro planeta si los primeros organismos que poblaban los mares primigenios no hubieran tenido la capacidad de incorporar el hierro para la síntesis de la clorofila y por consiguiente la capacidad de realizar la fotosíntesis. Posteriormente, como consecuencia de la fotosíntesis, se fue acumulando oxígeno en la atmósfera hasta formar la capa de ozono que impidió el paso de las radiaciones ultravioleta nocivas para los organismos vivos que de esta forma pudieron salir de los mares y empezar a colonizar la superficie terrestre. El hierro también está implicado en la respiración celular, que es un proceso clave para el correcto desarrollo y funcionamiento de la célula.

Por su parte, el fósforo participa en multitud de procesos biológicos, entre ellos los relacionados con la utilización de energía por la planta (es componente del ATP, entre otras moléculas energéticas), la estructura de las membranas celulares y la síntesis de ácidos nucleicos (componentes del material genético ADN). Los primeros organismos vivos se constituyeron gracias a la formación de membranas de fosfolípidos impermeables al agua que permitieron aislarlos del medio exterior y poder empezar a realizar procesos metabólicos simples en su interior. En la formación de estas membranas el fósforo es un elemento imprescindible, sin cuya presencia, hubiera sido imposible la formación de estas primitivas formas de vida que finalmente desembocaron en las actuales formas de vida que conocemos. Por otro lado, no se considera a un ser vivo como tal hasta que no adquiere la capacidad de transmitir a su descendencia la información genética que él mismo posee, ése fue el origen de las especies. En ese proceso, el fósforo también es una pieza clave ya que está implicado en la formación de la estructura de la cadena de ADN, molécula encargada de la transmisión de la información genética o herencia a la descendencia.

Todos éstos, son aspectos que nos hacen recapacitar sobre el papel protagonista de pequeños detalles, como la presencia de ambos elementos, hierro y fósforo, en los procesos del origen de la vida, que de forma puntual y concreta han sido claves para generar la vida tal y como hoy la concebimos. Muy probablemente, de no haber hecho uso de estos dos elementos, la vida se hubiera abierto camino de cualquier otro modo pero, sin lugar a dudas, sería muy diferente a como la conocemos actualmente.

Hoy en día, ambos elementos suscitan gran interés, a nivel agronómico, debido a los efectos negativos que causan sus deficiencias en los cultivos. Un mejor conocimiento sobre ambos, ayudará a diseñar nuevas estrategias de manejo de los fertilizantes de hierro y de fósforo, que ayuden a encontrar la rentabilidad a los cultivos de manera sostenible.

## CONSECUENCIAS DE LA DEFICIENCIA DE HIERRO (Fe)

El hierro (Fe) suele ser un elemento abundante en el suelo, pero poco accesible para las plantas. La poca disponibilidad del hierro se debe principalmente a condiciones adversas del suelo, como elevado contenido de bicarbonato, elevado pH, compactación o encharcamiento. Algunas de estas condiciones son particularmente frecuentes en suelos calcáreos, abundantes en España y en otros países con regiones semiáridas, en los cuales la aparición de clorosis férrica (amarilleamiento internervial de las hojas jóvenes por falta de clorofila) es uno de sus principales problemas. De modo que la falta de hierro provoca amarillez en las hojas (clorosis) ya que el hierro es indispensable para que se sintetice la clorofila, que es el pigmento verde responsable de captar la luz para que se pueda llevar a cabo la fotosíntesis.

Una vez en el interior de la planta, el hierro presenta una baja movilidad en el floema y apenas se transloca desde los tejidos viejos hacia los tejidos y/u órganos en crecimiento. Por ello, los primeros síntomas visibles de su carencia se presentan en hojas jóvenes, en tanto que las hojas más viejas permanecen verdes (Figura 1, foto izquierda).

En los árboles frutales, esta deficiencia causa disminuciones en el crecimiento vegetativo de la planta, una notable pérdida del rendimiento y calidad de la fruta y una disminución de la duración de la vida del árbol (Figura 1, foto derecha).



Figura 1: Detalles de síntomas de deficiencia de hierro en plantas de melocotonero (izquierda) y plantación de membrilleros en suelo calcáreo con ejemplar en primer plano con claros síntomas de clorosis férrica causados por la deficiencia de hierro (derecha).

## POSIBLES SOLUCIONES AL PROBLEMA DE LA DEFICIENCIA DE HIERRO

- **Adición de fertilizantes con hierro.** Son eficientes pero conlleva un coste muy elevado para el agricultor y el exceso de su uso puede repercutir negativamente sobre el medioambiente. Foto izquierda.
- **Selección de variedades resistentes a la clorosis férrica.** Eficiente y sin coste medioambiental. Requiere una gran inversión de tiempo. Foto central.
- **Mejora de la capacidad de adquisición de hierro.** Requiere la modificación genética de la planta. Aún en fase experimental. Foto derecha.



Figura 2. Diferentes soluciones al problema de la deficiencia de hierro.

### CONSECUENCIAS DE LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO (P)

Con respecto al fósforo (P), cabe resaltar que la concentración de fosfato inorgánico ( $P_i$ ), la forma de fósforo que es absorbida por las raíces de las plantas, está casi siempre muy por debajo de la cantidad necesaria para el mantenimiento óptimo de los cultivos. Ello es debido principalmente a varias propiedades que presenta el fosfato inorgánico ( $P_i$ ) en el suelo, como son: su reducida movilidad; la facilidad para precipitar en formas insolubles con cationes como el magnesio (Mg), el Calcio (Ca) y su fijación a compuestos orgánicos del suelo.

Las plantas que tienen deficiencia de fósforo presentan un color verde oscuro y a menudo desarrollan coloración roja o púrpura, debido a la acumulación de pigmentos del grupo de las antocianinas. Además, presentan claros síntomas de enanismo, con tallos cortos y delgados.

El fósforo, al contrario de lo que ocurre con el hierro, se redistribuye fácilmente por la planta, moviéndose de un órgano a otro. En situaciones de deficiencia, éste se retransloca desde las hojas antiguas a las más jóvenes, a las flores y a las semillas que se encuentran en desarrollo. El resultado de todo esto es que los síntomas de deficiencia se presentan en primer lugar en las hojas maduras.



Figura 3. Síntomas de deficiencia de fósforo en plantas de tomate (izquierda) y plantación de colza afectada por la deficiencia de fósforo (derecha).

## DIMENSIONES DEL PROBLEMA Y RESPUESTA DE LA PLANTA A LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO (P)

La deficiencia de fósforo constituye una de las limitaciones principales de la agricultura moderna. Los abonos fosfatados se obtienen de yacimientos en los que las reservas son cada vez más escasas. Casi el 90% de las reservas de fósforo estimadas se encuentran en cinco países: Marruecos (primer exportador mundial), China, Argelia, Siria y Sudáfrica. El agotamiento de este elemento fundamental para la vida, no renovable y no sintetizable artificialmente, supone un riesgo para el futuro de la producción de alimentos.



Figura 4. Yacimiento de fósforo en Marruecos (izquierda) y detalle de abono fosfatado listo para su uso (derecha).

## POSIBLES SOLUCIONES AL PROBLEMA DE LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO

- **Adición de fertilizantes con fósforo.** Son eficientes pero conlleva un coste muy elevado para el agricultor y el exceso de su uso puede repercutir negativamente sobre el medioambiente. La acumulación de fosfatos conduce a la eutrofización de las aguas. Foto izquierda.
- **Uso de hongos micorrizas.** Ayudan a adquirir fósforo sin riesgo ambiental. Las raíces colonizadas por micorrizas absorben fosfato de dos a seis veces más eficientemente que las no colonizadas. Figura de la derecha.

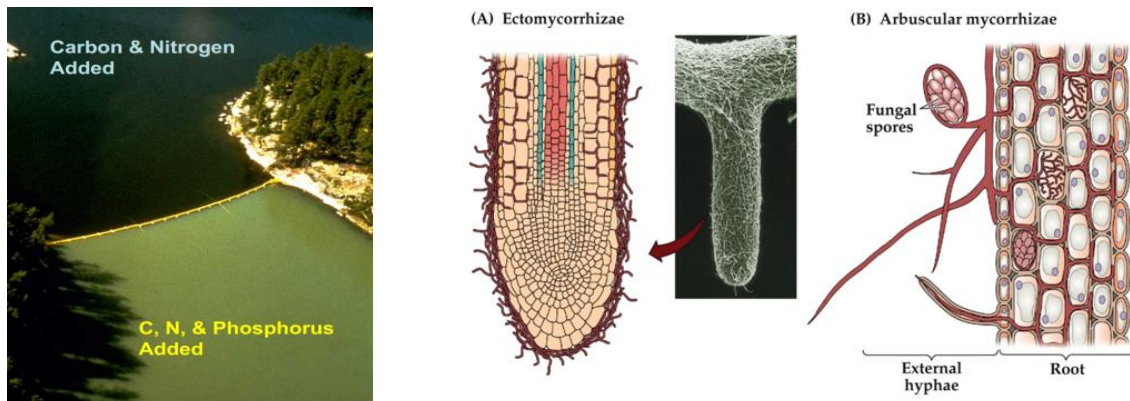


Figura 5. Comparativa de aguas superficiales eutrofizadas por el aporte excesivo de fósforo proveniente de la agricultura y otras no eutrofizadas que no recibieron el aporte de fósforo (izquierda). Detalle la colonización de las raíces por hongos micorrizas (derecha).

## MECANISMOS DE RESPUESTA QUE LAS PLANTAS ACTIVAN FRENTE A LA DEFICIENCIA DE HIERRO O DE FÓSFORO

Las plantas, a lo largo de la evolución, han adoptado multitud de estrategias adaptativas para solucionar ambos estreses nutricionales. Cuando sufren deficiencia de hierro o de fósforo, las plantas dicotiledóneas inducen cambios fisiológicos y morfológicos en sus raíces, conocidos como mecanismos de respuesta a la deficiencia de hierro o de fósforo, conducentes a incrementar su absorción. Los más importantes son:

### ➤ Deficiencia de hierro (Fe).

- **Desarrollo de pelillos radicales:** para aumentar la superficie de contacto con el exterior del suelo y aumentar la posibilidad de abastecerse de hierro.

- **Incremento de la capacidad de reducir el  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ :** antes de ser absorbido, las plantas tienen que reducir el  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ , porque el  $\text{Fe}^{3+}$  no lo pueden asimilar. Lo hacen a través de un enzima llamado reductasa férrica (FRO2) localizada en la membrana de las células epidérmicas de la raíz y que está codificada por el gen *FRO*.

- **Incremento de la capacidad para absorber  $\text{Fe}^{2+}$ :** una vez reducido, el  $\text{Fe}^{2+}$  es transportado al interior de la raíz a través de la proteína IRT1 que se encuentra en la membrana de las células epidérmicas de la raíz y codificada por el gen *IRT*.

- **Acidificación de la zona de suelo próxima a la raíz:** algunas especies de plantas son capaces de bajar el pH del suelo mediante la salida de protones ( $\text{H}^+$ ) al exterior. Esto favorece la solubilización del hierro y facilita la reducción del  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  ya que la reductasa férrica (FRO2) incrementa su actividad a pH ácido (entre 4 y 5).

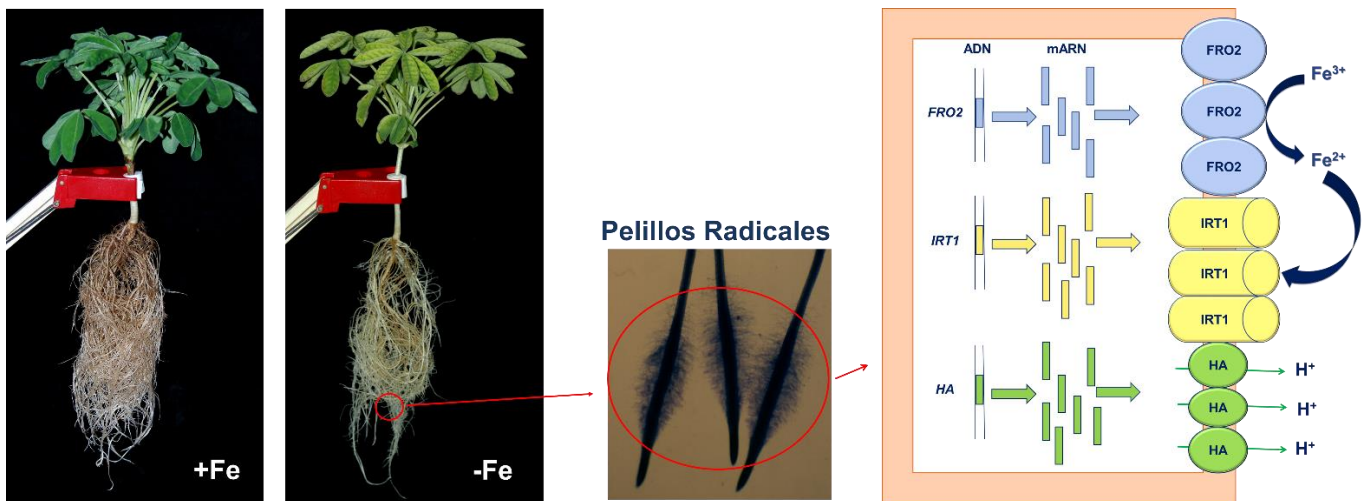


Figura 6. Composición fotográfica que permite apreciar los síntomas de clorosis férrica provocados por la deficiencia de hierro (-Fe) sobre plantas de altramuç. Foto detalle de la proliferación de pelillos radicales en las zonas subapicales de las raíces y esquema representativo de las diferentes respuestas que las plantas dicotiledóneas activan frente a la deficiencia de hierro.

### ➤ Deficiencia de fósforo (P).

Por lo que respecta a la deficiencia de fósforo, las plantas han adoptado también estrategias de respuesta de carácter fisiológico y morfológico, encaminadas a incrementar su absorción. Estos mecanismos, en muchos casos, son parecidos a los que se desarrollan con la deficiencia de hierro.

- **Cambios en la configuración estructural de la raíz:** mediante reducción del crecimiento en la raíz primaria y la aparición de raíces secundarias con gran cantidad de raíces proteoides, que son capaces de absorber mayor cantidad de fósforo.

- **Exudación de fosfatasas a la zona de suelo próxima a la raíz:** generalmente el fósforo es poco accesible para las plantas en la mayoría de los suelos. Las plantas exudan al exterior de la raíz fosfatasas ácidas que tienen la capacidad de arrebatar grupos fosfato a otras moléculas del suelo para poder asimilarlo. Estas fosfatasas están codificadas por el gen *ACP5*.

- **Incremento en la capacidad para absorber fósforo (P):** mediante el incremento de los transportadores de membrana PT2, codificados por el gen *PT2*, que se induce con deficiencia de fósforo. Los transportadores, al igual que el resto de respuestas, se encuentran localizados en las células epidérmicas de las raíces proteoides, mayoritariamente.

- **Acidificación de la zona de suelo próxima a la raíz:** al igual que ocurre con la deficiencia de hierro, la acidificación del medio, favorece la asimilación del fósforo, por lo que también es una respuesta que las plantas activan frente a deficiencia de fósforo.

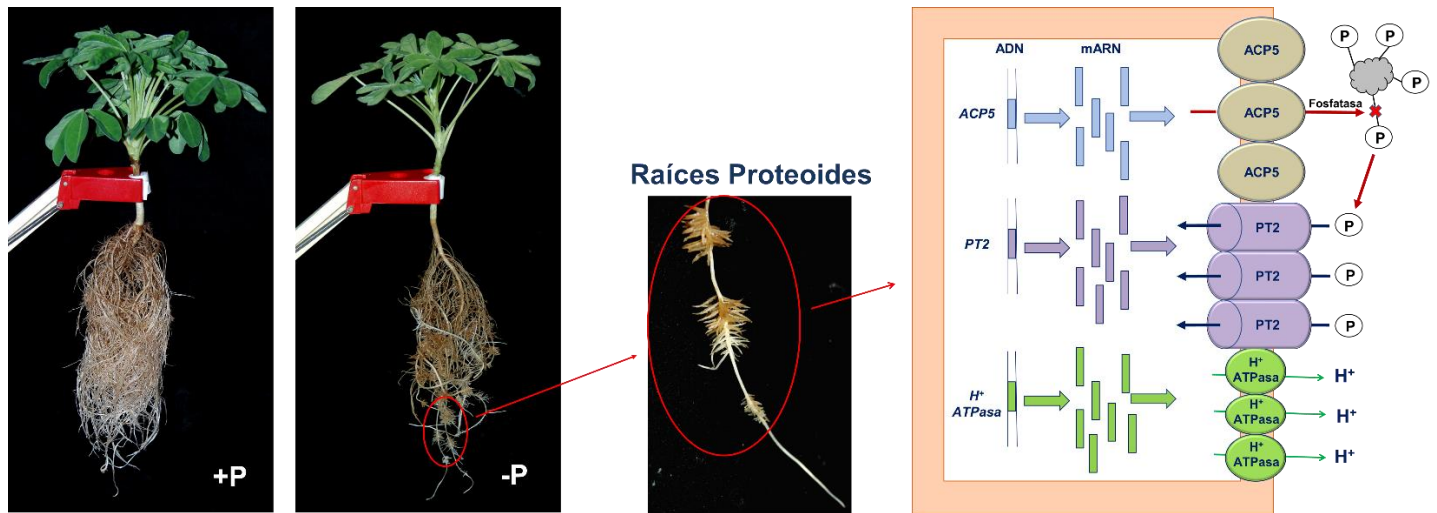


Figura 7. Composición fotográfica que permite apreciar los síntomas de escaso crecimiento tanto de parte aérea como de raíz provocados por la deficiencia de fósforo (-P) sobre plantas de altramuç. Foto detalle de la proliferación de raíces proteoides en las zonas subapicales de las raíces y esquema representativo de las diferentes respuestas que las plantas dicotiledóneas activan frente a la deficiencia de fósforo.

## CONCLUSIONES

1. Hierro (Fe) y fósforo (P) han jugado un papel crucial en la formación de la vida en nuestro planeta. Ambos elementos participan en procesos tan importantes para las plantas que, sin su presencia, la vida en nuestro planeta sería muy diferente a como la conocemos actualmente.
2. Hierro (Fe) y fósforo (P) se han convertido en los elementos más limitantes para la producción de alimentos de la agricultura moderna. La deficiencia de estos dos elementos en los cultivos, genera dos problemas agronómicos de gran importancia que tienen implicaciones ambientales y económicas de enormes dimensiones en la agricultura actual.
3. Actualmente es urgente encontrar nuevas estrategias de uso y manejo del hierro y del fósforo, que minimicen los impactos medioambientales que produce su empleo en la agricultura moderna y sirvan para ajustar los costes en las explotaciones agrícolas, debido a los elevados precios que están alcanzando tanto los abonos férricos como los abonos fosfatados.
4. Dada la estrecha relación y similitudes existentes entre estos dos elementos, es necesario conocer mejor, a través del estudio y de la investigación, las bases fisiológicas y moleculares de su interacción, para conseguir que los cultivos mantengan una nutrición mineral adecuada de ambos elementos y evitar los problemas asociados a su uso inadecuado.
5. La enorme biodiversidad que alberga nuestro planeta es consecuencia, en parte, de la acción de dos elementos perdidos de la tabla periódica, hierro y fósforo. Hagamos



todo lo posible para que sigan ejerciendo su discreta hegemonía durante mucho tiempo más. Los hijos de nuestros hijos nos lo agradecerán.