

APLICACION FOLIAR DE NUTRIENTES: RETOS Y LIMITES EN LA PRODUCCION AGRICOLA

V. Romheld y M. El-Fouly*

Introducción

Por décadas, la fertilización foliar ha sido un método establecido de aplicación de nutrientes desde que se demostró, alrededor del año 1850, que las plantas pueden absorber nutrientes por las raíces y por las hojas.

Durante el primer Taller Internacional de Fertilización Foliar que se llevó a cabo en Berlín, Alemania, en marzo de 1985, se generó una intensa discusión sobre diversos aspectos de la fertilización foliar. Sin embargo, al examinar varias de las conclusiones de este taller queda la impresión de que son necesarias varias correcciones y aclaraciones si se considera en más detalle los aspectos fisiológicos de la fertilización foliar. Durante este evento se sostuvo que la fertilización foliar, comparada con la fertilización al suelo, era la mejor técnica de fertilización, debido a la mayor utilización de los nutrientes y menor contaminación ambiental. Fácilmente se puede demostrar que éste no es el caso, debido a que la absorción y utilización de los nutrientes aplicados al follaje también tienen limitaciones, por ejemplo, en el caso de los nutrientes requeridos en dosis altas como potasio (K) y nitrógeno (N) o en el caso de nutrientes de baja movilidad en el floema como calcio (Ca), boro (B) y manganeso (Mn). La fertilización foliar debe ser considerada únicamente como una aplicación suplementaria durante las etapas críticas de crecimiento de la planta y durante etapas con malas condiciones ambientales. A continuación se discuten varios de los aspectos más relevantes en la nutrición foliar de los cultivos.

Principios de la absorción de nutrientes por las hojas

Para lograr rendimientos de calidad y rentables, se deben considerar los siguientes aspectos con relación a la aplicación foliar de fertilizantes:

- n Para un cultivo específico, cuál es la mejor época de aplicación durante el ciclo de crecimiento. Cuántas aplicaciones se requieren para el rendimiento y calidad esperados.
- n Qué tipo de fertilizante o fórmula se debe aplicar.
- n Qué aditivos o condicionadores se deben utilizar.

Para responder estas preguntas de interés en la fertilización foliar de cultivos se necesita entender los procesos envueltos en la absorción de nutrientes por las hojas y en la distribución de estos nutrientes dentro de la planta. Para que un nutriente cumpla una función en

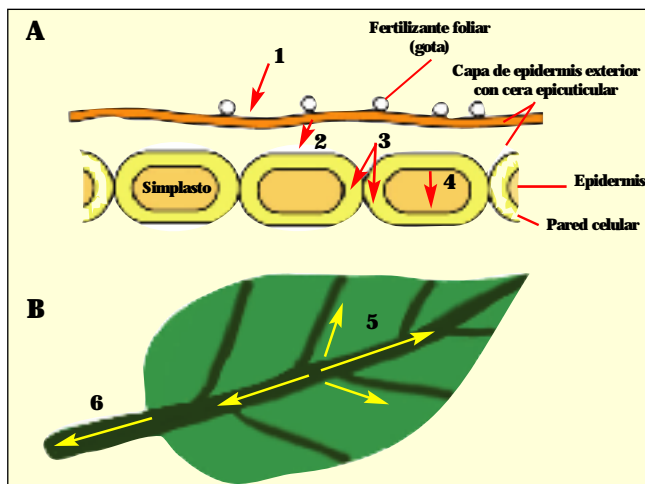


Figura 1. Pasos en la absorción de nutrientes por las hojas. 1- Mojado de la superficie de las hojas con la solución del fertilizante; 2- Penetración a través de la pared celular epidérmica exterior; 3- Entrada en el apoplasto de la hoja; 4- Absorción en el simplasto de la hoja; 5- Distribución dentro de la hoja; 6- Transporte fuera de la hoja.

las hojas o para que sea translocado de la hoja hacia otros órganos, se requiere un proceso de absorción vía membrana del plasma del apoplasto hacia el simplasto. Se deben considerar los siguientes pasos (Figura 1):

Mojado de la superficie de la hoja con la solución de fertilizantes

La superficie exterior de las células de las hojas está cubierta por la cutícula y una capa epicuticular de cera con fuertes características hidrofóbicas. Para facilitar la necesaria absorción de nutrientes se requiere utilizar aditivos (detergentes) para reducir la tensión superficial.

Penetración a través de la pared celular epidérmica exterior

La pared celular epidérmica exterior de las hojas está cubierta por una cutícula y una capa epicuticular de cera para proteger las hojas de una pérdida excesiva de agua por transpiración así como pérdidas de nutrientes y otros solutos por lixiviación con la lluvia.

Esta protección se logra por las propiedades hidrofóbicas de la cutícula y la cera, las cuales están constituidas de largas cadenas de alcoholes, ketonas y ésteres de largas cadenas de ácidos grasos. Se han discutido varios caminos de penetración de los nutrientes a través de la pared celular. Un concepto generalmente aceptado es la penetración a través de poros hidrofílicos en la cutícula. Estos poros son ricos

* Tomado de: Romheld, V. and M. El-Fouly. 1999. Foliar nutrient application: Challenges and limits in crop production. Proceedings of the 2nd International Workshop on Foliar Fertilization. Fertilizer Society of Thailand. Bangkok, Thailand.

en pectina hidrofílica. La cantidad de estos poros cuticulares es mayor en las paredes celulares, entre las células guardianes, y las células subsidiarias de los estomas. Esto explica la correlación positiva que a menudo se observa entre el número de estomas y la intensidad de absorción de nutrientes.

Además de los poros cuticulares, se ha sugerido que otro mecanismo sería la presencia de microcanales hidrofílicos, denominados ectodesmata, sin embargo, no existe suficiente evidencia experimental de la existencia de estas estructuras.

La absorción de solutos directamente a través de los estomas abiertos hacia los tejidos de la hoja (apoplasto de la hoja) es poco probable, debido a que las células guardianes están cubiertas de una capa cuticular. Sin embargo, existen reportes recientes de penetración de solutos por los estomas que consideran posible el proceso debido a que la capa cuticular del estoma tiene un contenido menor de ceras hidrofóbicas. Sin embargo, para considerar relevante la penetración de solutos por los estomas debe encontrarse una razón válida que explique porqué no existen diferencias en absorción de nutrientes durante el día y durante la noche (estomas abiertos y cerrados).

Entrada de nutrientes en el apoplasto de la hoja

El apoplasto de la hoja es un importante espacio ocupado por los nutrientes antes de la absorción a través de una membrana plasmática al simplasto de un célula individual. Los nutrientes entran en el espacio apoplástico después de la penetración de las paredes de las células epidermales exteriores, pero también llegan desde las raíces vía xilema. Las condiciones químicas del apoplasto (como pH) son decisivas para la posterior absorción en el simplasto y podrían ser manipuladas con adecuados aditivos.

Se ha demostrado también que los diferentes genotipos exhiben diferente penetración de nutrientes a través de las paredes celulares exteriores, lo que influye en la posterior absorción en las células interiores de la hoja.

Absorción de nutrientes dentro del simplasto de la hoja

Los principios generales de la absorción de nutrientes del apoplasto hacia el simplasto de la hoja son los mismos de la absorción de nutrientes en las células de las raíces. Se ha demostrado que la absorción es mayor:

- n Cuando las moléculas son más pequeñas en comparación con moléculas más grandes (urea > quelato de Fe).
- n Si las moléculas no tienen carga en comparación con iones [H_3BO_3 > $\text{B}(\text{OH})_4^-$, ... ácido bórico > borato].
- n Cuando los iones tienen una carga en comparación con iones de dos o más cargas ($\text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$; $\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{HPO}_4^{2-}$).

- n Cuando los aniones están en un apoplasto de menor pH.
- n Cuando los cationes están en un apoplasto de mayor pH.

En contraste con la absorción de nutrientes por las raíces, la absorción por las células de las hojas es más dependiente de factores externos como humedad y temperatura y es directamente afectada por la luz.

La absorción de nutrientes en el simplasto a través de la membrana plasmática es dependiente de energía y está mediada por proteínas de transporte con H^{\pm}ATP (adenosina trifosfato). Esto incrementa la fuerza de absorción al establecer gradientes electromagnéticos en la superficie de la membrana.

Otro asunto de interés es el determinar si la absorción de nutrientes por las células de la hoja está regulada por el estado nutricional de la planta, como es el caso de la absorción por las raíces. La absorción de fósforo (P) es regulada por el estado nutricional de la planta, es decir, la planta absorbe más nutriente si éste se encuentra en deficiencia, sin embargo, la absorción de hierro (Fe) no está regulada por el estado nutricional de la planta y como sucede con la absorción de Fe por las raíces, la absorción de Fe en las células de las hojas requiere de un paso intermedio de reducción. Substancias reductoras en el apoplasto de la hoja y presumiblemente la luz directa juegan un papel más importante en la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} en las hojas como un paso previo para la absorción.

Se ha estudiado también la dependencia de la absorción de nutrientes del pH de los fluidos del apoplasto de toda la hoja y se ha encontrado solamente una dependencia menor en el rango de pH fisiológicamente relevante. Por esta razón, se excluye la hipótesis de la inactivación del Fe por condiciones de pH (precipitación) como la primera causa de los síntomas de deficiencia de Fe. Sin embargo, se ha determinado que la acumulación preferencial de Fe a lo largo de las venas de las hojas está relacionada con el incremento de pH del xilema y de los fluidos apoplásticos. Este incremento de pH es producido por estrés (sequía, salinidad, alto CO_2 en el

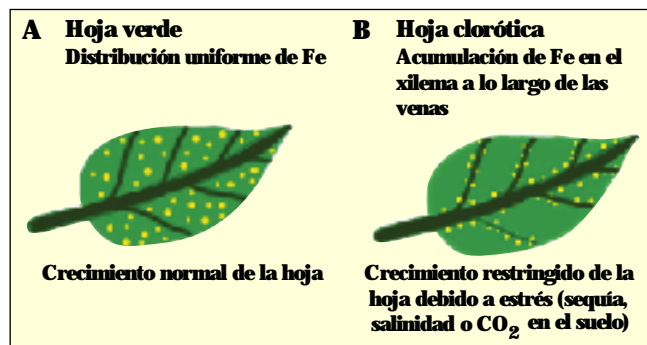


Figura 2. Acumulación preferencial de hierro a lo largo de las venas de las hojas cloróticas como consecuencia de un incremento del pH en el xilema y fluido apoplástico debido a estrés por sequía, salinidad y alto contenido de CO_2 en el suelo.

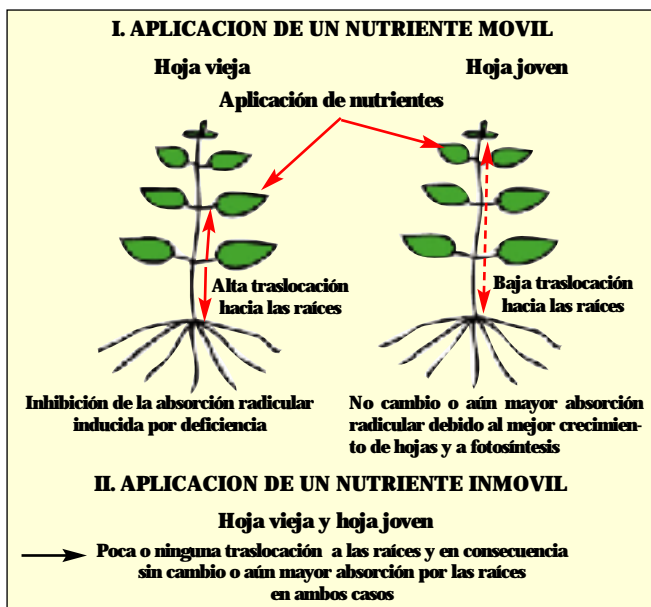


Figura 3. Posibles efectos de la aplicación foliar de nutrientes en la absorción de nutrientes por las raíces dependiendo de la movilidad del nutriente y del sitio de aplicación.

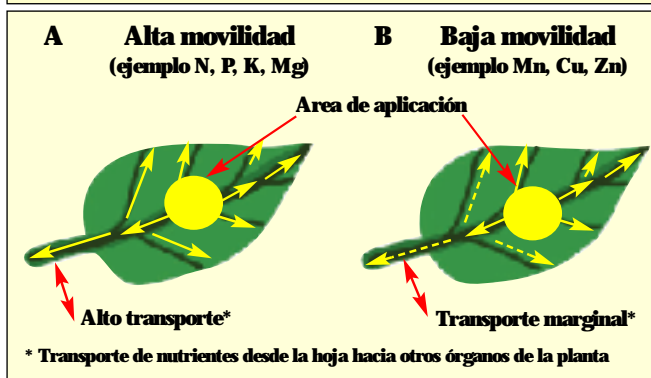


Figura 4. Movimiento de los nutrientes aplicados dentro y hacia afuera de la hoja.

suelo) y puede incrementar el pH hasta en 2 unidades. Este incremento de pH de los fluidos apoplásticos inducido por estrés inhibe la expansión de la hoja y la absorción de Fe en el simplasto con la consecuente acumulación de Fe en el apoplasto localizado a lo largo de las venas (Figura 2).

Se ha afirmado que la aplicación foliar de fertilizantes promueve la absorción de nutrientes por las raíces. No se puede hacer una afirmación tan general porque esto depende de la movilidad de los nutrientes aplicados dentro de la planta y el sitio de la aplicación de los nutrientes (hojas viejas u hojas jóvenes) como se ilustra en la Figura 3.

En el caso de los nutrientes móviles como el N, P o K y con una aplicación dirigida a las hojas viejas, la retranslocación del nutriente aplicado en las hojas hacia las raíces puede inhibir la absorción radicular inducida por la deficiencia del nutriente. Por otro lado, si este nutriente móvil es aplicado principalmente a las hojas jóvenes que todavía no se han expandido totalmente, la

mayoría del nutriente se incorpora en los tejidos de las hojas todavía en crecimiento, sin una marcada translocación y sin una subsecuente inhibición sino más bien un incremento de la absorción del nutriente del suelo por las raíces. La aplicación de nutrientes inmóviles [calcio (Ca), azufre (S), Fe, zinc (Zn), boro (B), cobre (Cu), manganeso (Mn)] no inhibe y aun puede incrementar la absorción del nutriente por las raíces.

Distribución de los nutrientes dentro de la hoja y su translocación hacia otras partes de la planta

La distribución de un nutriente dentro de la hoja y su translocación hacia fuera de la hoja depende de la movilidad del nutriente en el floema y xilema como se indica en la Figura 4. Los nutrientes móviles en el floema, como el K, P, N y magnesio (Mg), se distribuyen dentro de la hoja en forma acropetalica (por el xilema) así como en forma basipetalica (por el floema) y gran parte del nutriente absorbido puede ser transportado fuera de la hoja a otras partes de la planta donde existe alta demanda (sumideros). Por otro lado, los nutrientes con una restringida movilidad en el floema como el Ca, S, Cu, Fe, Mn y Zn se distribuyen en la hoja principalmente en forma acropetalica, sin que exista una considerable translocación del nutriente fuera de la hoja. La movilidad del B dentro de la planta depende mucho del genotipo y esto tiene particular importancia en el manejo de la aplicación foliar de este nutriente.

Fertilización foliar como suplemento de la aplicación de fertilizantes al suelo

La absorción de nutrientes por las raíces puede ser un factor limitante para lograr adecuado desarrollo y rendimientos rentables. Esto puede suceder durante períodos críticos de desarrollo de la planta (ontogénesis) o durante ciertas condiciones ambientales como sequía o temperaturas extremas del suelo. Bajo estas condiciones la fertilización foliar es ventajosa como se discute a continuación:

Eficacia rápida

La fertilización foliar es mejor que la fertilización al suelo cuando se presentan condiciones de severas deficiencias nutricionales con la presencia de agudos síntomas de deficiencia en los tejidos. Esto se debe a que se suplementa el nutriente requerido directamente a la zona de demanda en las hojas y a que la absorción es relativamente rápida. En la Tabla 1 se presenta la velocidad de absorción de varios nutrientes por los tejidos.

Independencia de la actividad radicular

Durante la etapa de llenado del grano o fruto de los cultivos anuales y perennes de alto rendimiento se produce una alta competencia para obtener asimilados

(producto de la fotosíntesis) por parte de diversos sumideros (zonas de necesidad) en la planta. En esta etapa las raíces no están adecuadamente suplidas con energía en forma de carbohidratos y por esta razón, la adquisición de nutrientes por las raíces (en esta etapa de alto requerimiento) no es suficiente para satisfacer la demanda y la aplicación foliar suplementa esta necesidad. La adquisición de nutrientes por las raíces puede inhibirse también por la presencia de factores externos que reducen la actividad radicular. Estos factores físicos y químicos pueden ser baja temperatura, compactación, falta de oxígeno, sequía, alta salinidad o pHs extremos.

Alta capacidad de fijación de nutrientes por el suelo

En el caso de suelos con extrema capacidad de fijar o precipitar nutrientes la aplicación foliar puede ser una buena alternativa. En general, la fertilización foliar con micronutrientes en cultivos creciendo en zonas áridas o semiáridas produce una excelente respuesta en crecimiento y rendimiento.

Posibilidad de aplicación precisa de nutrientes en el tiempo

Durante etapas específicas del crecimiento de la planta existen requerimientos más altos de nutrientes o de nutrientes específicos. La aplicación a las hojas es una mejor técnica para entregar estos nutrientes en la etapa requerida. Estas etapas de alta demanda se presentan generalmente durante el desarrollo floral y la polinización. Por ejemplo, en mango la inducción foliar es promovida por la aplicación de nitrato (NO_3) y la iniciación de brotes en manzana por amonio (NH_4). En las condiciones mencionadas, la fertilización foliar como suplemento de aplicación de fertilizantes tiene efectos muy positivos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, sin embargo, no se debe descuidar el adecuado suplemento a las raíces.

Fertilización foliar y la resistencia a enfermedades y plagas

En muchos casos la calidad de los productos cosechados está determinada por el contenido de nutrientes. Además, la estabilidad de poscosecha depende del contenido de ciertos nutrientes en particular como el Ca. Por esta razón se requiere de alta disponibilidad de nutrientes durante la formación del fruto. La fertilización foliar es particularmente eficiente para lograr este propósito. Un buen ejemplo es la aplicación de Ca durante el crecimiento del fruto de manzana y tomate para evitar los problemas de calidad de fruto comunes en estos cultivos. Varios reportes demuestran que la aplicación de nutrientes a las hojas mejora la calidad del fruto.

La demanda de alimentos con alto contenido de

Tabla 1. Tiempo de absorción de nutrientes en los tejidos.

Nutriente	Tiempo para que se absorba 50%
Nitrógeno (como urea)	1/2 - 2 horas
Fósforo	5 - 10 días
Potasio	10 - 24 horas
Calcio	1 - 2 días
Magnesio	2 - 5 horas
Zinc	1 - 2 días
Manganeso	1 - 2 días

micronutrientes, en particular en los países en desarrollo, apoya todos los esfuerzos del productor para incrementar el contenido de micronutrientes en los cultivos.

Si se piensa en la presión para reducir el uso de pesticidas, es necesario considerar todas las medidas que incrementen la resistencia de la planta a las plagas y enfermedades. Además del conocido efecto del K, micronutrientes como Mn, Cu y Zn pueden incrementar esta resistencia. Esta mejoría en rendimiento está gobernada principalmente por la participación de los micronutrientes en las enzimas responsables del mecanismo de resistencia sistemática.

Técnicas de aplicación, consideraciones prácticas y aspectos económicos

Además de los aspectos fisiológicos de la fertilización foliar se deben también considerar los aspectos técnicos de esta práctica. Debido a la baja movilidad de varios nutrientes dentro de la planta y la poca posibilidad de aplicar dosis altas (particularmente macronutrientes) se requieren repetidas aspersiones durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. Además, la fertilización foliar tiene solamente una eficacia de corto plazo, particularmente en los cultivos perennes. Por estas razones, la frecuencia de las aplicaciones foliares es decisiva para determinar la eficacia económica de la práctica. Aun cuando las dosis foliares son mucho más bajas que las aplicaciones al suelo, los altos costos en mano de obra de las repetidas aplicaciones foliares pueden hacer prohibitiva la práctica. Por ejemplo, en el caso de aliviar la clorosis causada por deficiencia de Fe usando quelatos, la utilización de quelatos menos estables para la aplicación foliar puede compensar por el costo de repetidas aplicaciones si se compara con el costo de aplicación de quelatos de Fe al suelo.

Una de las consideraciones más importantes es el escoger el apropiado compuesto foliar ha utilizarse. El número de productos en el mercado es grande y es difícil para el agricultor el poder escoger el más

una etapa específica de crecimiento. Los rangos de concentraciones de nutrientes en estos productos pueden variar considerablemente lo que hace aun más difícil la decisión final.

Conclusiones finales

La fertilización foliar tiene limitaciones específicas de tipo fisiológico debido a la limitada movilidad de los nutrientes en el floema y a la alta dependencia en la época de aplicación. Existe un gran cantidad de ejemplos que demuestran que no existe superioridad de la fertilización foliar sobre la aplicación al suelo en términos de eficiencia total cuando la provisión de nutrientes es adecuada (cantidad, época y balance).

integrada de fertilización que utiliza la fertilización foliar como un suplemento de la fertilización al suelo. Existen etapas particulares en el crecimiento del cultivo durante las cuales la fertilización foliar tiene una ventaja clara. Es necesario conocer bien la fenología y la marcha de absorción de nutrientes de los cultivos para que la utilización de fertilizantes foliares sea realmente efectiva. Se debe tener en cuenta que la fertilización foliar es específica en términos de cultivo, época de aplicación durante el ciclo de crecimiento y sitio de la aplicación en la planta. En muy pocos casos se puede generalizar, y aun en estas condiciones las técnicas de aplicación pueden variar.^h