



INVESTIGACION
INPOFOS
EDUCACION

INSTITUTO DE LA POTASA Y EL FOSFORO
POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE
POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE OF CANADA

COMO MEJORAR LA EFICACIA DE LA FERTILIZACION APROVECHANDO LAS INTERACCIONES ENTRE NUTRIENTES

Tsuioishi Yamada*

Introducción

A través del análisis de suelos, un agrónomo experimentado es capaz de hacer una recomendación de fertilización, en un suelo determinado, para obtener rendimientos altos del cultivo en consideración. El presente artículo quiere demostrar que además del efecto individual de los nutrientes, las interacciones entre nutrientes, particularmente las interacciones nitrógeno (N) con fósforo (P) y N con potasio (K), son importantes para mejorar la eficiencia de la fertilización. De igual manera se quiere demostrar que es mejor usar fórmulas N-P, N-K ó N-P-K en lugar de aplicaciones de nutrientes individuales.

Como entran los nutrientes en contacto con las raíces de las plantas

Es consenso general, que cuanto más rico es el suelo en nutrientes, y si no existen restricciones (extremos de temperatura, compactación y niveles tóxicos de Al), la planta desarrolla un sistema radicular abundante y profundo. Este es un factor fundamental para la adecuada absorción de nutrientes y la producción de altos rendimientos de los cultivos.

Se ha determinado que los nutrientes en la solución del suelo entran en contacto con las raíces de las plantas de tres maneras diferentes: intercepción radicular, flujo de masa y difusión (Barber, 1995).

La intercepción radicular toma en cuenta la cantidad de nutrientes contactados por la raíz en crecimiento. Se cuantifica como la cantidad de nutrientes existentes un volumen del suelo igual al volumen de exploración de las raíces. Para cultivos anuales, el volumen de las raíces de una zona de crecimiento 0-20 cm es, en general, menor que el 1% del volumen total del suelo.

El flujo de masa transporta los nutrientes hacia la raíces por medio del movimiento del agua en el suelo. La dimensión del flujo de masa se calcula multiplicando el volumen de agua transpirada por planta por la concentración de nutrientes en esta agua.

JULIO 2003

No. 50

Contenido

	Pág.
Como mejorar la eficacia de la fertilización aprovechando las interacciones entre nutrientes	1
Consumo de nutrientes por los frutos y bandolas de café caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Aquiares, Turrialba, Costa Rica	7
Reporte de investigación reciente	13
Cursos y Simposios	14
Página Web-INPOFOS	15
Publicaciones de INPOFOS	16

Editor: Dr. José Espinosa

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se cite la fuente y el autor.

* Tomado de: Yamada, T. 2002. Melhoría na eficiência da adubação aproveitando as interações entre os nutrientes. *Informações Agronomicas*. Potafos 100: 1-5.

Tabla 1. Concentración de nutrientes en la solución del suelo (Barber, 1995).

Nutrientes	Concentración ($\mu\text{mol/L}$)
NO_3^-	100-50 000
NH_4^+	100-2 000
H_2PO_4^- y HPO_4^-	1-50
K^+	100-4 000

La difusión se calcula por la diferencia entre el total de nutrientes absorbidos por la planta, menos la suma de la intercepción radicular y el flujo de masa. Cuando la intercepción radicular y el flujo de la masa no suplementan cantidades suficientes de un nutriente dado, la continua absorción del nutriente por las raíces deprime la concentración del nutriente en la superficie radicular. Esto causa una gradiente de concentración que es la fuerza que promueve el proceso de difusión del nutriente de la región de mayor concentración en el suelo hacia la de menor concentración en la superficie radicular.

El flujo de masa es el mecanismo de movimiento dominante para el nitrato (NO_3^-) que, en general, tiene mayor concentración en la solución del suelo que los otros nutrientes (**Tabla 1**). Con el P, debido a la menor concentración de este nutriente en la solución del suelo, la difusión es el mecanismo preponderante de contacto ión-raíz. Para el K (y el amonio, NH_4^+) son importantes los mecanismos de difusión y flujo de masa (**Tabla 2**).

El modelo mecanístico de Barber-Cushman (Barber, 1995) demuestra que la absorción de NO_3^- es influenciada por la tasa de crecimiento radicular (cm/s), el flujo máximo ($\text{nmol/m}^2/\text{s}$) y por la media del radio de la raíz (cm). Para el P, K y NH_4^+ , los parámetros de mayor sensibilidad fueron la tasa de crecimiento radicular (cm/s), la concentración inicial de la solución del suelo ($\mu\text{mol/L}$) y la media del radio de la raíz (cm). Como se puede ver, independientemente del suelo y del mecanismo de movimiento de los nutrientes, es fundamental que haya una buena tasa de crecimiento radicular durante el ciclo de crecimiento de la planta. Es importante entonces trabajar para tener un sistema radicular abundante y profundo.

Efecto de la fertilización en el crecimiento radicular

El suplemento de nutrientes afecta marcadamente el crecimiento, morfología y distribución del sistema radicular, tanto en sustratos artificiales como en el perfil del suelo. Este efecto es mucho más claro con el N. En las plantas cultivadas en el suelo, el efecto de N en el incremento de la superficie de área radicular es, en general, más acentuado

con N amoniacal (N-NH_4) que con N nítrico N-NO_3 (Marschner, 1995).

Las raíces de maíz tienden a proliferar en zonas que contienen materia orgánica y fertilizantes, principalmente en suelos con bajos contenidos de N y P. Los cultivos de cereales que encuentran altos niveles de N al inicio del crecimiento (que disminuye a lo largo del ciclo por nitrificación) producen precozmente mayor área foliar y consecuentemente mayor fotosíntesis para posterior crecimiento radicular. El efecto del P en el crecimiento radicular es un efecto indirecto, la disponibilidad de P incrementa la fotosíntesis, lo que a su vez aumenta el sistema radicular. El K, a pesar de no tener un efecto directo en el desarrollo radicular, es importante para algunas funciones fisiológicas como el transporte de nutrientes y metabolitos, organización celular y control de la permeabilidad de las células (Gardener et al., 1985).

Debido al efecto estimulante del N en el desarrollo radicular, cuando hay una alta disponibilidad de N en la capa superficial del suelo existe el riesgo potencial de promover una alta acumulación de raíces en la superficie, a expensas de la penetración radicular en el subsuelo. Se considera que la aplicación profunda de fertilizantes, particularmente de N, mejora el desarrollo de las plantas que resisten mejor el estrés hídrico debido a pueden utilizar la amplia reserva de agua en las capas profundas del suelo (Garwood y Williams, 1967). Se ha observado el mismo efecto en maíz en Brasil, cuando se aplica y se incorpora el N a presiembra debido que se incrementa la resistencia de las plantas al verano.

En las especies anuales, la densidad radicular aumenta varias veces en las zonas de altas concentraciones de nutrientes, como se observa en las **Figuras 1 y 2**.

Se ha demostrado que la alta productividad de maíz en la región de la Pampas Argentinas, con suelos fértiles y ricos en materia orgánica, está correlacionada con altas cantidades de N disponible en el suelo (N-NO_3^- medido a 60 cm de profundidad) al momento de la siembra (García, 2002). Para rendimientos superiores a 12 t/ha es necesario tener, al momento de la siembra, por lo

Tabla 2. Participación de los mecanismos de contacto ión-raíz en la producción de 9.5 toneladas de maíz en un suelo fértil de Estados Unidos (Barber, 1995).

Nutriente	Cantidades necesarias para 9.5 t/ha	----- Nutrientes suprimidos por -----		
		Intercepción radicular	Flujo de masa	Difusión
-----kg/ha-----				
Nitrógeno	190	2	150	38
Fósforo	40	1	2	37
Potasio	195	4	35	156

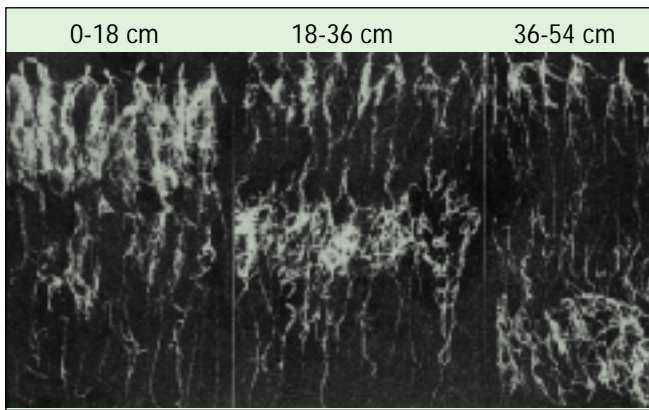


Figura 1. El efecto de la localización de fertilizante nitrogenado a diferentes profundidades en la distribución de las raíces de cebada cultivadas en suelo arenoso (Gliemerth, 1953, citado por Marschner, 1995).

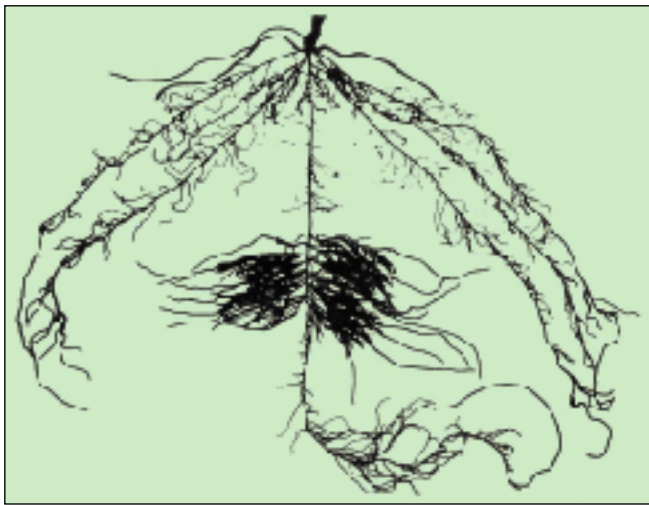


Figura 2. Modificaciones en el sistema radicular de la cebada con el suplemento de 1 mM de nitrato en la parte media de la raíz por 15 días. La parte restante del sistema radicular recibe apenas 0.01 mM de nitrato (Drew y Saker, 1975, citados por Marschner, 1995).

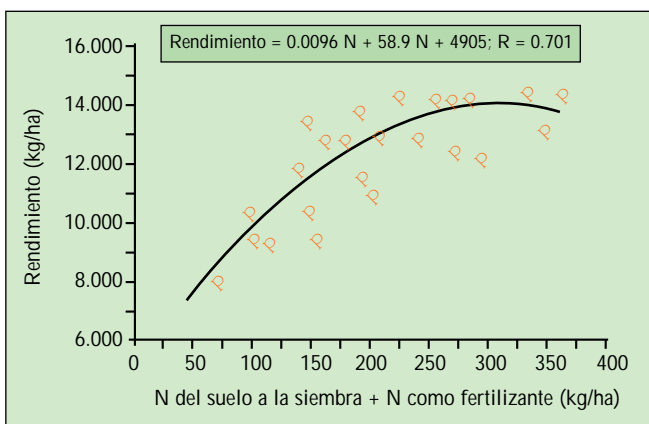


Figura 3. Rendimiento de maíz en función a N disponible para el cultivo (N-NO₃ en el suelo a 0-60 cm + N aplicado como fertilizante) en cinco ensayos de campo conducidos 2001/02, en Córdoba y Santa Fé, Argentina (Bianchini et al., 2002, citados por García, 2002).

menos el equivalente a 170 kg/ha de N disponible. Se considera N disponible al momento de la siembra la suma el N-NO₃ en la capa de 0-60 cm más el N aplicado como fertilizante (Figura 3).

Es interesante observar que el máximo flujo de nutrientes hacia las raíces se produce durante los primeros 20 días iniciales del ciclo de la planta, como se observa en la Tabla 3. Obsérvese que la tasa de absorción de N a los 30 días es siete veces menor que a los 20 días, y a los 50 días es 20 veces menor.

Estos datos son suficientes para convencer a los escépticos de la importancia de realizar una fertilización nitrogenada lo más pronto después de la siembra si existe el equipo para esta operación. Caso contrario, es mejor hacer la aplicación en presiembra durante el período de descanso de las máquinas y operadores, sin correr el riesgo de no realizarla en la época adecuada.

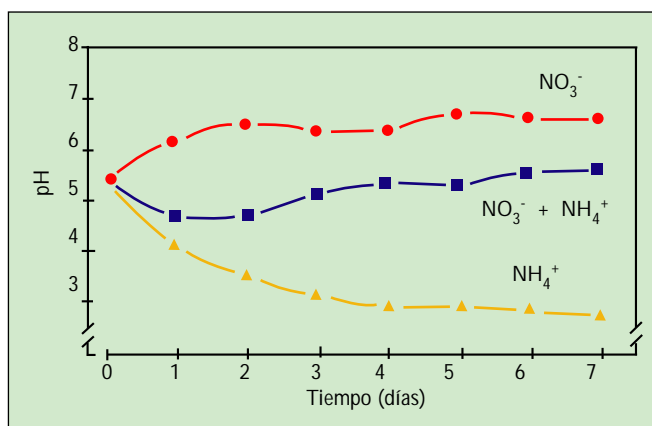
Efecto del nitrógeno amoniacal en el aumento de la absorción de fósforo

La fuente de suplemento de N (NH₄⁺, NO₃⁻, fijación de N₂) tiene un papel fundamental en la relación catión/anión en las plantas. Esto se debe a que el 70% de los cationes o aniones que ingresan a las plantas son NH₄⁺ ó NO₃⁻. En principio, las plantas nutridas con NH₄⁺ se caracterizan por absorber mayor cantidad de cationes que de aniones y lo contrario ocurre con las plantas nutridas por NO₃⁻, que absorben más aniones que cationes. Como consecuencia de las diferentes tasas de absorción de cationes y aniones el pH de la solución externa se afecta apreciablemente, dependiendo del suplemento de NH₄⁺ o NO₃⁻ (Figura 4). En general, el pH externo alrededor de las raíces (rizosfera) de las plantas nutridas con NO₃⁻ aumenta con el tiempo. Lo opuesto ocurre con las plantas nutridas solamente con NH₄⁺. En las plantas que tienen un suplemento mixto de NH₄⁺ y NO₃⁻ existe una reducción inicial de pH por absorción preferencial de NH₄⁺ hasta que éste se agote y luego un incremento de pH típico de la absorción NO₃⁻.

Se conoce por mucho tiempo que el N aumenta la absorción de P por la planta cuando se colocan juntos en el suelo. El efecto es mayor con el N-NH₄⁺ que con el N-NO₃⁻, debido a la reducción del pH en la superficie de la raíz provocada por la absorción de NH₄⁺. Esto aumenta la disponibilidad de P para la absorción por las plantas. Esta condición se ha demostrado estudiando el efecto de la adición conjunta de sulfato de amonio y de fosfato monocalcico (marcado con ³²P) en la absorción de P. El estudio utilizó 4 suelos diferentes con pH de 4.2 a 8.2 (Blair et al., 1971). Como los resultados fueron prácticamente

Tabla 3. Absorción de nutrientes por el maíz en función de la edad de la planta (Barber, 1995).

Edad de las plantas (días)	N ----- $\mu\text{mol/m raíz/día}$ -----	P	K
20	226.9	11.3	52.9
30	32.4	0.90	12.4
40	18.5	0.86	8.00
50	11.2	0.66	4.75
60	5.7	0.37	1.63
70	1.2	0.17	0.15
80	0.46	0.08	0.06
90	2.0	0.10	0.37
100	4.2	0.23	0.16

**Figura 4. Comportamiento de pH en la solución externa cuando se suplementa solamente NO_3^- , solamente NH_4^+ , o con una relación de 8 de NO_3^- con 1 NH_4^+ a plantas de sorgo. Concentración total de N = 300 mg/L (Clark, 1982, citado por Marschner, 1995).****Tabla 4. Influencia de la fuente de nitrógeno en el desarrollo de la parte aérea del maíz en un suelo de pH 5.5.**

Tratamientos	-----Parte aérea del maíz-----		
	Materia seca g/maceta	P total $\mu\text{g/mg}$	P fertilizante ¹ $\mu\text{g/mg}$
Control	2.71 a	3.37 a	-
Solo P	3.35 a	5.07 b	2.02 a
P + KNO_3	5.41 a	5.13 b	2.48 a
P + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	8.92 b	8.00 c	5.18 b

¹ Fósforo proveniente del fosfato monocalcico marcado con ³²P.
Valores con letras diferentes en las columnas son significativamente diferentes al 95% de probabilidad con la prueba de Duncan.

iguales para todos los suelos, se presentan los datos obtenidos con el suelo de pH de 5.5, el más próximo a las condiciones de suelos tropicales (Tabla 4).

Se puede observar en la Tabla 4 que el sulfato de amonio aplicado junto con el fosfato monocalcico fue el que logró la mayor producción de materia seca, acumulación P en la parte aérea y mejor eficiencia de

Tabla 5. Influencia de la fuente de nitrógeno en el desarrollo radicular del maíz en suelo de pH 5.5.

Tratamientos	----- Raíces del maíz -----		
	Materia seca mg	Ca $\mu\text{g/mg}$	P fertilizante ¹ $\mu\text{g/mg}$
Control	71.4 a	2.2 b	-
Solo P	124.3 b	1.0 a	0.30 b
P + KNO_3	39.0 a	2.7 b	0.45 b
P + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	197.3 c	1.0 a	0.07 a

¹ Fósforo proveniente del fosfato monocalcico marcado con ³²P.
Valores con letras diferentes en las columnas son significativamente diferentes al 95% de probabilidad con la prueba de Duncan.

absorción de P del fertilizante aplicado. La Tabla 5 muestra una mayor producción de materia seca de la raíz con el tratamiento con sulfato de amonio. Se observa también un menor residuo de Ca y P en la superficie de la raíz, lo que demuestra la mayor absorción de fosfato monocalcico cuando se aplica junto con el sulfato de amonio.

Esto explica el gran éxito de las formulaciones de NPK con más de 10% de N que se logran con la mezcla de sulfato de amonio, urea y MAP junto con KCl. Estas mezclas deben su efectividad al efecto de N-NH_4^+ en la reducción del pH de la rizosfera y la reducción de la tasa de nitrificación debido al anión cloruro, lo que permite que permanezca más tiempo el N en forma de N-NH_4^+ en el suelo. Esto se discute a continuación.

El papel del anión cloruro en la inhibición de la nitrificación

Se ha estudiado el efecto del cloruro de potasio en la nitrificación de dosis crecientes N aplicado como sulfato de amonio en un suelo ácido tropical proveniente de plantaciones de te en Sri Lanka (Golden et al., 1981). En la Tabla 6 se presentan los datos de este estudio. Se observa que la adición de KCl redujo la nitrificación, hecho que se evidencia por la mayor cantidad de NH_4^+ presente en los tratamientos con KCl luego de dos meses de incubación. Ensayos adicionales probaron que el efecto provenía del anión cloruro y no del catión K^+ .

El potasio es el transporte de nitrógeno

El N puede ser absorbido como catión NH_4^+ o como anión NO_3^- . Como se discutió anteriormente, la absorción de NH_4^+ reduce el pH en la rizosfera y lo contrario sucede con NO_3^- . El NO_3^- es la principal forma de N disponible en la mayoría de suelos bien aireados. Cuando se suplementa solamente de NH_4^+ las plantas sufren varios problemas debido a alteraciones en la estructura de los cloroplastos causadas por la

Tabla 6. Efecto de el cloruro de potasio en la nitrificación del sulfato de amonio adicionado a un suelo ácido tropical después de dos meses de incubación, a una profundidad de 0-15 cm.

----- kg/ha-----		pH (H ₂ O)	N-NH ₄ ⁺ remanente ³ (ppm)
N ¹	K ²		
0	0	4.65	5.8
112	0	4.30	5.0
224	0	3.85	3.9
336	0	3.85	27.6
112	116	4.55	5.9
224	116	3.90	96.0
336	116	3.75	166.8

1 Dosis de N como sulfato de amonio
2 Dosis de K como cloruro de potasio
3 N-NH₄⁺ extraído con solución KCl 2N

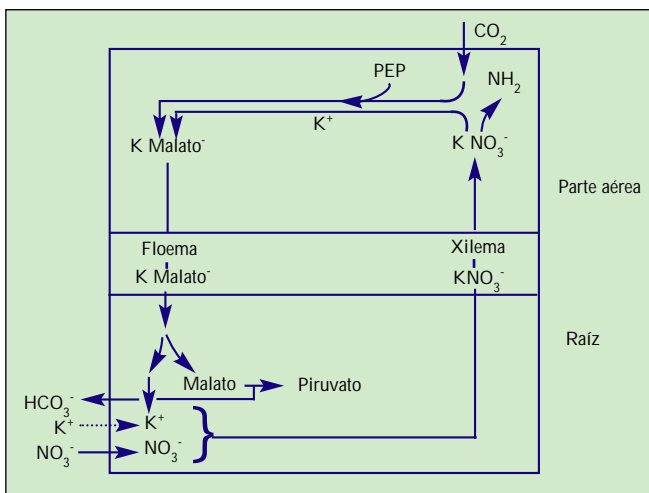


Figura 5. Modelo de la circulación de potasio entre la raíz en la parte aérea con transporte de nitrato y malato (PEP = fosfoenol piruvato) (Fuente original Marschner, 1995, con datos de Ben-Zion et al., 1971 Kirby and Kirby, 1977).

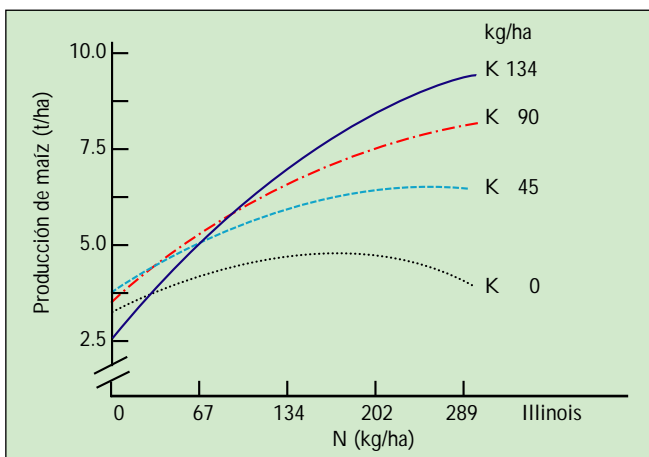


Figura 6. La utilización óptima del N depende del nivel de K (Dibb y Thompson, 1985).

toxicidad de amoníaco (NH₃). En general, las plantas se desarrollan mejor cuando se suplementa conjuntamente NH₄⁺ y NO₃⁻. La mayor parte del NH₄⁺ se incorpora a los compuestos orgánicos en las raíces, mientras que el

NO₃⁻ se mueve rápidamente en el xilema y puede ser acumulado en las vacuolas de las raíces, en la parte aérea y en los órganos de almacenamiento. Para ser incorporado a la estructura orgánica, el NO₃⁻ debe reducirse a amoníaco (NH₃), a través de reacciones mediadas por dos enzimas: nitrato reductasa y nitrito reductasa que son las responsables de la reducción del NO₃⁻ a nitrito (NO₂) y finalmente a NH₃. El molibdeno (Mo) es un elemento esencial para el cambio de NO₃ a NO₂.

En general, se admite que las plantas leñosas reducen el NO₃⁻ en las raíces, en las herbáceas perennes en las raíces y en la parte aérea y en los cultivos anuales en la parte aérea. El sitio donde ocurre predominantemente la reducción de NO₃⁻ (sea raíz o parte aérea) tiene un impacto importante en el circulación de K en la planta (Figura 5).

Muchos experimentos soportan la hipótesis de que la absorción y transporte del NO₃⁻ hacia la parte aérea de las plantas, vía xilema, transporta también al K⁺ que luego desciende vía floema con el malato. El malato, que transporta el K⁺ hacia las raíces, se descarboxila formando piruvato y bicarbonato (HCO₃⁻). El HCO₃⁻ puede entonces ser intercambiado con NO₃⁻, produciendo así el incremento de pH en la rizosfera. El reciclaje de K⁺ es un componente clave de este modelo y para que funcione adecuadamente necesita de una abundante concentración de K en el suelo.

Es obvio entonces que la respuesta al N depende de las dosis de K aplicadas o del K presente en el suelo, como se muestra la Figura 6 que grafica la respuesta del maíz al N con diferentes dosis de K, en Illinois, Estados Unidos (Dibb y Thompson, 1985).

Potasio y la síntesis de proteína

Es interesante observar la alta correlación ($r = 0.98$) entre el contenido de K y el de proteínas en las semillas de algunos cultivos (Tabla 7).

Una posible explicación para que los cultivos con altos contenidos de proteína necesiten (y exporten) grandes cantidades de K en el grano sería la participación del K en el transporte de N para la síntesis proteica y en la neutralización de los grupos carboxilos de los aminoácidos formados (Figura 7) (Blevins, 1985, 1989).

Consideraciones finales

El N es el nutriente que más estimula la proliferación del sistema radicular, principalmente cuando se encuentra en forma amoniacal. Además, el N amoniacal aumenta la eficiencia de la fertilización fosfatada, que a su vez tiene un efecto positivo en el desarrollo radicular.

Tabla 7. Correlación entre el contenido de potasio y de proteínas en las semillas de algunos cultivos (Blevins, 1985).

Cultivo	K ⁺	Proteína bruta
	----- g/kg -----	
Soya	17.7	380
Frijol	13.8	253
Algodón	12.0	231
Girasol	7.1	179
Cebada	5.5	126
Avena	4.8	121
Trigo	4.7	120
Centeno	5.2	113
Sorgo	3.9	110
Maíz	3.3	90
r = 0.98		

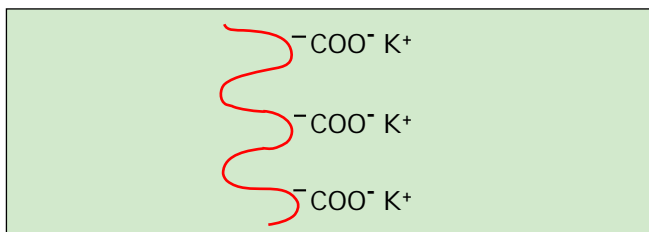


Figura 7. Neutralización por el K⁺ de los grupos carboxílicos del aspartato y del glutamato de las proteínas de semilla de soja (Blevins, 1989).

El ión cloruro reduce la tasa de nitrificación y mantiene el N del suelo en forma amoniacal. En consecuencia, la aplicación de cloruro de potasio junto a la urea o el sulfato de amonio mantiene por más tiempo el N en forma amoniacal, lo que incrementa el volumen del sistema radicular y aumenta la absorción de P proveniente del suelo o del fertilizante.

El K está envuelto en el transporte ascendente del NO_3^{-} de las raíces hacia la parte aérea y en el descendente con malato hacia las raíces. Además, el K participa en la síntesis de proteínas.

Es fundamental que exista un adecuado balance entre los macronutrientes N, P, K, Ca, Mg y S y los micronutrientes B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn, para el buen crecimiento de las plantas y microorganismos benéficos al suelo. Estos nutrientes deben estar en el suelo desde el inicio del crecimiento, cuando es mayor la tasa de absorción de estos elementos.

Bibliografía

Barber, S. A. 1995. Soil nutrient bioavailability - a mechanistic approach. 2ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. 414p.

Below, F. E. 1995. Nitrogen metabolism and crop productivity. In: Pessarakli, M. (ed.) Handbook of plant and crop physiology. New York: Marcel Dekker, Inc.

Blair, G. J., C. P. RIL, and M.H. Miller. 1971. Influence of nitrogen source on phosphorus uptake by corn from soils differing in pH. *Agronomy Journal*, 63:235-238.

Blevins, D. G. 1989. Nutrients associated with physiological and morphological changes for improved soybean yield. In: The physiology, biochemistry, nutrition and bioengineering of soybeans, St. Louis, 1989. Proceedings... FAR/PPI.

Blevins, D. G. 1985. Role of potassium in protein metabolism in plants. In: Munson, R. D. (ed.). Potassium in Agriculture. Madison: ASA/CSSA/SSSA.

Clark, R. B. 1982. Nutrient solution growth of sorghum and corn in mineral nutrition studies. *Journal of Plant Nutrition*, 5: 1039-1057.

Dibb, D.W., and J. R. Thompson. 1985. Interaction of potassium with others nutrients. In: Munson, R.D. (ed.). Potassium in Agriculture. Madison: ASA/CSSA/SSSA.

García, F. O. 2002. Manejo de la fertilidad de suelos y fertilización de cultivos para altos rendimientos en la región pampeana argentina. In: Conferencia de Fertilizantes Cono Sur. Porto Alegre, 2002. Resumen... British Sulphur Pub.

Gardener, P. F., R. B. Pearce, and R. G. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. Ames: Iowa State University, 1985.

Garwood, E. A., and T. E. Williams. 1967. Growth, water use and nutrient uptake from the subsoil by grass swards. *Journal of Agric.* 9:25-130.

Golden, D. C., S. Sivasubramaniam, S. Sandanam, and M. A. Wijedasa. 1981. Inhibitory effects of commercial potassium chloride on the nitrification rates of added ammonium sulphate in an acid red yellow podzolic soil. *Plant and Soil*, 59: 47-151.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London: Academic Press Limited. ✍