



# FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICACIA DEL GLIFOSATO

Por: Julio Menéndez\*, Jacinto González Gutiérrez\* y Rafael de Prado\*

## ¿POR QUÉ ALGUNOS TRATAMIENTOS FALLAN SIN MOTIVO APARENTE?

Los herbicidas disponibles hoy día en el mercado son productos extremadamente eficaces que, siempre y cuando se sigan las recomendaciones de uso indicadas por el fabricante, proporcionan en la mayoría de los casos un control adecuado de las malas hierbas tratadas. Sin embargo, la eficacia de los herbicidas de postemergencia, y más concretamente los foliares, es muy variable. De hecho, no es del todo infrecuente que un tratamiento no ofrezca un resultado satisfactorio, incluso a pesar de haber realizado la aplicación herbicida siguiendo las especificaciones de la etiqueta y conforme a las buenas prácticas agrícolas.

Existen múltiples variables responsables de esta diversidad en la actividad esperada de los herbicidas (diferencias en penetración y/o translocación, diferencias en su degradación, diferencias en la sensibilidad del sitio de acción, etc.). De todas ellas, las más importantes son la mayor o menor capacidad de la formulación herbicida de quedarse pegada de una manera duradera a la superficie foliar (adherencia), y su mayor o menor capacidad de atravesar las sucesivas barreras existentes en la hoja hasta alcanzar su sitio de acción (penetración). Las razones son evidentes, considerando que el vector de los

tratamientos herbicidas es el agua, mientras que la cutícula (la capa cerosa que recubre las hojas y que funciona como barrera que evita la pérdida incontrolada de agua en las plantas) es de marcado carácter hidrófobo. La adherencia y la penetración se ven afectadas a su vez por dos grupos de factores:

- Un primer grupo de factores que intervienen *antes* del tratamiento y que están ligados a la planta (especie, estadio) y a las condiciones meteorológicas durante el crecimiento.
- Un segundo grupo de factores que intervienen *durante* y *después* del tratamiento y que están ligados a las condiciones meteorológicas durante la aplicación (viento, humedad del aire, rocío), las características del tratamiento (tamaño de las gotas, número de impactos, volumen de aplicación) y la formulación (tipo de formulación, adyuvantes).

## EL CASO DEL GLIFOSATO

De todos es conocido que el glifosato es un herbicida no selectivo de postemergencia que presenta una alta actividad frente a un amplio espectro de malas hierbas de porte herbáceo anuales y perennes, tanto acuáticas como terrestres. Las propiedades herbicidas del glifosato y sus sales derivadas fueron descritas por primera vez en 1971, siendo el único representante de su familia química (ya que el sulfosato no es más que un caso particular de glifosato). La acción princi-

pal del glifosato es la inhibición de una enzima, la 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintasa, la cual interviene en la ruta de biosíntesis de tres aminoácidos esenciales: la fenilalanina, la tirosina y el triptófano. La inhibición de esta enzima resulta en una parada de la síntesis de proteínas, lo cual repercute en el crecimiento de la planta, así como en la acumulación de un precursor de estos aminoácidos que resulta fitotóxico. Esta enzima sólo se encuentra en plantas, hongos y bacterias, por lo que el herbicida no es tóxico. Existen diversos análogos del glifosato que demuestran una cierta selectividad frente a determinados cultivos, pero éstos sólo presentan una actividad biológica débil. El glifosato no se comercializa en su forma de ácido libre, ya que de esta manera no es soluble en agua más que a razón de 12 g/l a 25 °C. Sin embargo, cuando se asocia con la isopropilamina o con el trimetilsulfonio (sulfosato), su solubilidad aumenta de manera considerable, siendo éstas las formas normalmente disponibles en el mercado.

El comportamiento químico del glifosato es bastante bien conocido. Así, se sabe que este herbicida forma complejos muy estables con iones trivalentes tales como el hierro férrico y el aluminio, pero también con iones divalentes como el cobre y el zinc, y en menor manera con el manganeso, el calcio y el magnesio. Entre pH 7 y 9, la molécula de glifosato presenta dos cargas negativas, mientras que a pH 3 alrededor del 80% del glifo-

(\*) Universidad de Córdoba.



sato cuenta con una sola carga negativa y el 20% restante es neutro. Esto quiere decir que, en condiciones prácticas de utilización, la forma ácida del glifosato es una molécula cargada negativamente, lo cual explica la baja penetración foliar de esta forma química. Efectivamente, al estar la cutícula foliar también cargada negativamente, se produce una repulsión electrostática entre ambos.

El glifosato es un herbicida que actúa exclusivamente por vía foliar, ya que en el suelo el glifosato es adsorbido rápidamente por las arcillas, las cuales lo inmovilizan e inactivan. Una vez en el suelo, su degradación es esencialmente microbiana. Su vida media en este sustrato es muy variable, pudiendo oscilar de varios días a varios años. Los factores que más influyen en la velocidad de degradación del glifosato parecen ser la población de microorganismos y el grado de adsorción del herbicida. De este modo, la actividad microbiana generalmente se correlaciona de manera positiva con la degradación, mientras que el pH y la presencia de materia orgánica tiene poca incidencia. Por otra parte, los cationes que forman complejos estables con el glifosato ( $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ) disminuyen su degradación, mientras que el fosfato, que libera al glifosato de sus sitios de fijación en las micelas de arcilla, la acelera.

### FACTORES QUE AFECTAN ESPECÍFICAMENTE A LA EFICACIA DEL GLIFOSATO

#### Las condiciones meteorológicas

La actividad del glifosato es más débil en

plantas que presentan un estrés hídrico con anterioridad al tratamiento. La figura 1 muestra la sensibilidad de *Lolium rigidum* al glifosato, según el primero se encuentre creciendo en un suelo seco o húmedo (respectivamente, 15-20% y 100% de la capacidad de campo) (Barralis y col., 1990). Mientras que las plantas no estresadas fueron completamente controladas transcurridos 14 días del tratamiento, sólo algunas plantas estresadas mostraron síntomas limitados de clorosis, siendo todas capaces de florecer y producir semillas viables. Numerosas observaciones realizadas en otras especies corroboran este aspecto. Una explicación a este hecho pudiera ser la disminución de la penetración del glifosato en las plantas estresadas debido a un aumento de la síntesis de ceras cuticulares. Otros factores que también podrían estar relacionados son la intensidad de la fotosíntesis, el transporte de sustancias a través de la planta y el crecimiento. El movimiento del glifosato dentro de la planta se ve favorecido por las condiciones que incrementan la fotosíntesis y la migración de asimilados, siendo ambos procesos reducidos en condiciones de estrés hídrico. Por otra parte el glifosato, al bloquear la síntesis de aminoácidos, afecta a la producción de proteínas. Como un estrés hídrico detiene el crecimiento, las necesidades de la planta en proteínas son limitadas y la acción del inhibidor se hace sentir menos.

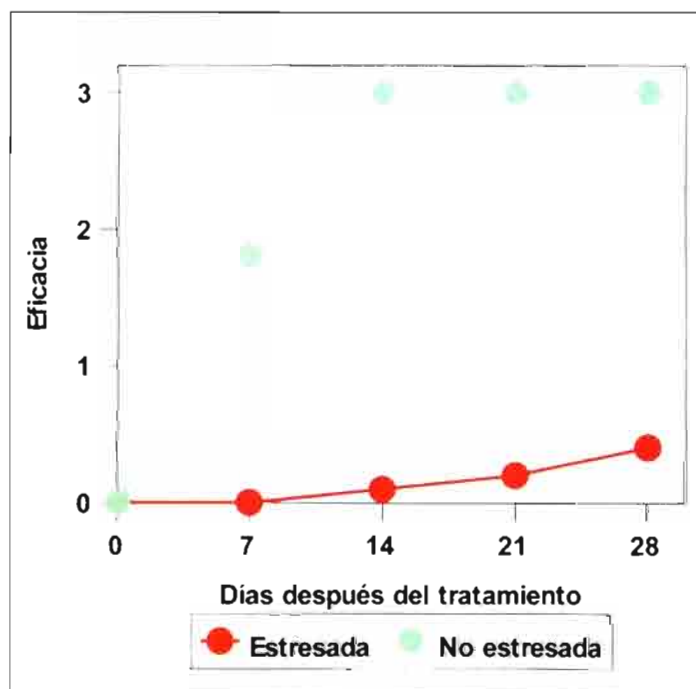
El glifosato penetra más rápidamente en las plantas cuando la humedad relativa del aire es elevada. Este hecho se justifica por-

que la hidratación de la cutícula crea una vía acuosa que facilita la entrada en la planta de herbicidas solubles en agua como la sal isopropilamina del glifosato. Sin embargo, esta solubilidad en agua lo hace también un herbicida muy sensible al lavado por la lluvia, por lo que la ausencia de precipitaciones en las 12-24h siguientes al tratamiento es esencial para asegurar la eficacia (Caseley, 1989).

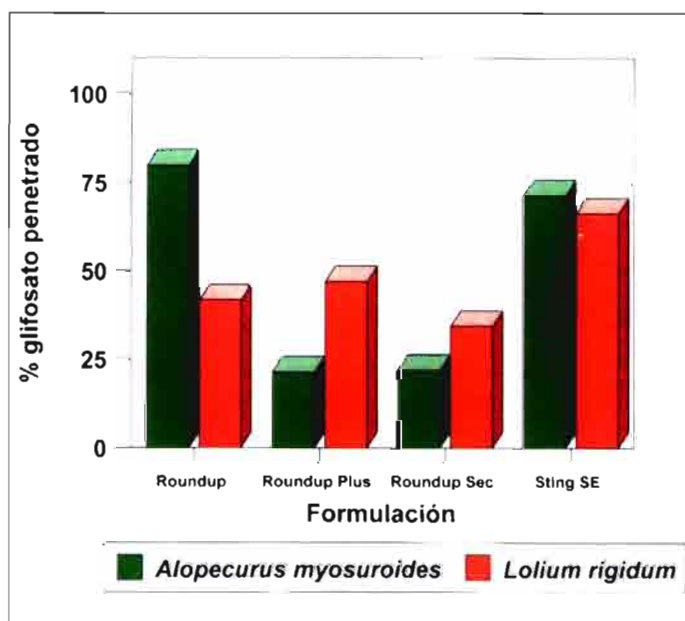
El efecto de la temperatura del aire sobre la efectividad del glifosato no está del todo claro, ya que diversas experiencias demuestran que ésta no juega más que un papel reducido en la penetración de este herbicida. Por el contrario, la temperatura del suelo si es un parámetro importante cuando la diana del glifosato son los órganos subterráneos. Así por ejemplo, la translocación del glifosato hacia los rizomas de grama (*Agropyrum repens*) es más importante cuando la temperatura del suelo es de 12-18 °C que cuando ésta es de 7 °C (Coupland, 1984).

En resumen, las condiciones meteorológicas que favorecen la acción herbicida del glifosato son:

- La ausencia de estrés hídrico en los días que precedan al tratamiento.
- Una humedad relativa del aire elevada en el momento del tratamiento y en las horas siguientes.
- Una temperatura y una humedad del suelo elevadas en el momento y en las jornadas siguientes al tratamiento.
- La ausencia de lluvia en las horas siguientes al tratamiento.



**Figura 1.** Efecto de un estrés hídrico en la eficacia del glifosato contra *Lolium rigidum*. Escala de eficacia: 0, sin síntomas; 1, clorosis limitadas; 2, clorosis extendidas; 3, muerte de la planta. (Barralis y col., 1990).



**Figura 2.** Penetración de cuatro formulaciones de glifosato en *Lolium rigidum* y *Alopecurus myosuroides*. Las plantas fueron tratadas con una dosis equivalente a 1 kg m.a. glifosato/ha en un volumen de caldo de 100 L/ha, y la penetración medida transcurridos 24 h del tratamiento. Los valores mostrados son medias de tres experimentos (Menéndez y De Prado, 1996; González-Gutiérrez y De Prado, 1998).



**Las condiciones de aplicación**

La correcta formulación del glifosato es un factor importante a la hora de mejorar su eficacia herbicida, tal y como demuestra el hecho de que, a una misma dosis de materia activa, la penetración del glifosato puede variar según el producto comercial empleado (figura 2). Este hecho se ve incrementado cuando necesitamos aditivar la formulación comercial con algún tipo de adyuvante debido a la existencia de problemas específicos que los productos comerciales existentes no pudieran resolver. En general, la mayoría de los mojantes incrementan en mayor o menor grado la fitotoxicidad del glifosato. Sin embargo, los mojantes iónicos derivados de aminas etoxiladas suelen dar mejores resultados que los no iónicos y, dentro de éstos últimos, los éteres de nonilfenil-polietilenglicol (tipo Agral) son más idóneos que los éteres de octilfenil-polietilenglicol (tipo Citowett) (Nalewaja y col., 1996).

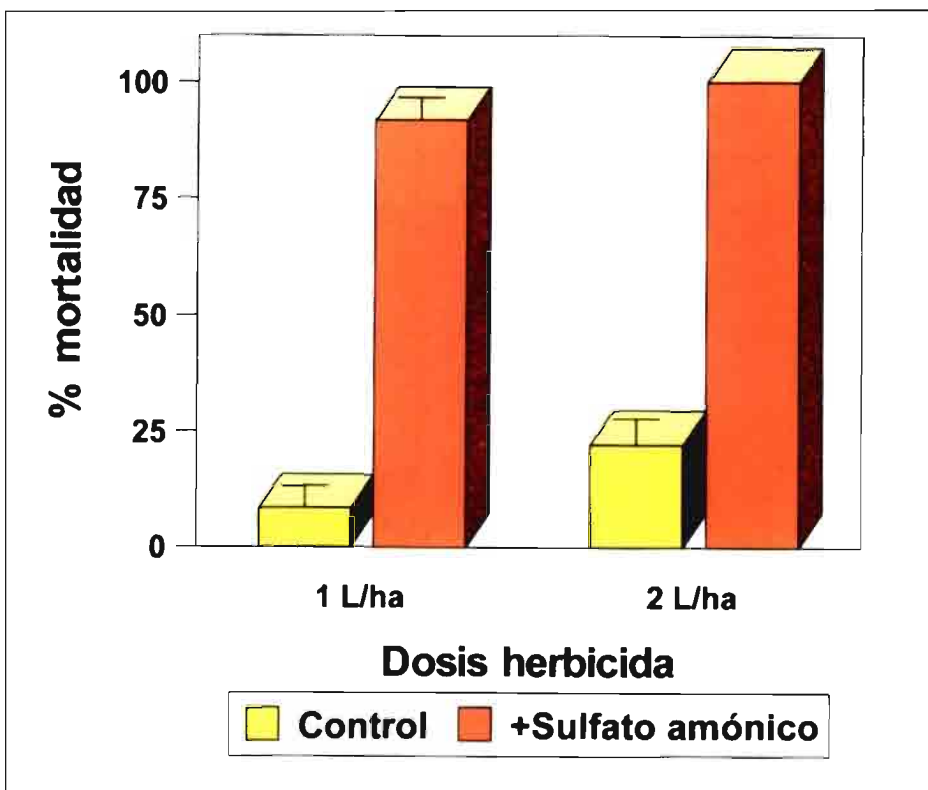
La calidad del agua empleada en la solución herbicida también juega un papel importante en la eficacia del glifosato. Se acepta que las soluciones/emulsiones de glifosato-agua son sistemas complejos en las que existe un equilibrio entre las moléculas de glifosato ácido libre y sus sales de isopropilamina, siendo todos estos componentes susceptibles de reaccionar con los iones presentes en el agua durante el secado de las microgotas del tratamiento. Por consiguiente, las variables del agua que más afectan a la actividad del glifosato son la alcalinidad (pH) y la dureza (presencia de cationes  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$ ). Según hemos mencionado con anterioridad, la carga negativa de la molécula de glifosato aumenta conforme el agua se hace más alcalina (aumenta el pH del medio), por lo que también aumenta la facilidad del herbicida para reaccionar con iones con carga positiva. Como consecuencia, el uso en el caldo de tratamiento de aguas "duras" de carácter alcalino y altas concentraciones de calcio, magnesio y sodio facilita que estos iones reaccionen con el glifosato, desplazando el



No debe llover en las horas siguientes al tratamiento



**Figura 3.** Orden de eficacia de las diferentes sales de glifosato.



**Figura 4.** Efecto de la adición de sulfato amónico (1% peso/volumen) sobre la eficacia en postemergencia contra *Lolium rigidum* de una formulación a base de glifosato y diflufenican empleada en condiciones desfavorables de baja dosis de herbicida y elevado volumen de aplicación (1/4 y 1/2 de la dosis recomendada, 800 L/ha de volumen de aplicación). Los datos son medias de tres experimentos. Fuente: Grupo de Herbicidas de la Universidad de Córdoba).



ion isopropilamino de la molécula del herbicida y formando sales que presentan muy bajo poder de penetración (figura 3). Efectivamente, la presencia del glifosato como una u otra sal determina su efectividad hasta tal punto de existir una gradación en su efecto fitotóxico, según el catión que vaya unido a la molécula de glifosato (figura 3) (Nalewaja y col., 1996). Asimismo, la acción de estos cationes (sobre todo el  $\text{Ca}^{2+}$ ) sobre el glifosato continúa en el tiempo, pasando de formar sales a estructuras de tipo quelato aún menos fitotóxicas (Thelen y col., 1995). La adición de un 1% (p/v) de sulfato de amonio al caldo de tratamiento mejora la acción herbicida del glifosato en presencia de aguas duras (figura 4). El ion amonio desplaza a los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^{2+}$  de la molécula de herbicida, formando una sal amónica de glifosato con mayor facilidad de penetración que las anteriores, mientras que el ion sulfato puede retirar al  $\text{Ca}^{2+}$  del medio, precipitándolo en forma de sulfato cálcico.

El glifosato es más activo a bajos volú-

menes de aplicación (figura 5). Parecería lógico pensar que, dado que el flujo con el que un compuesto atraviesa una membrana (en nuestro caso, la cutícula) es proporcional a la diferencia de concentración entre ambas caras de ésta, cuanto más concentrado está el herbicida, mejor penetrará en las plantas. Efectivamente, a una dosis dada, un herbicida preparado a 100 L/ha estará cinco veces más concentrado que a 500 L/ha... en la cuba de tratamiento. La realidad es que transcurridos 20 minutos de la aplicación el agua del caldo de tratamiento se ha evaporado y las diferencias desaparecen. La razón principal debe buscarse del lado de los adyuvantes los cuales, al estar más concentrados a bajo volumen, favorecen la penetración del glifosato. De hecho, si a una solución herbicida a volumen elevado de tratamiento le agregamos la cantidad de adyuvante necesario para obtener la concentración que éste debiera tener a bajo volumen, la eficacia del glifosato se incrementa (Gauvrit, 1996). A este efecto se añade también el hecho de

que, a volúmenes elevados de tratamiento, la relación glifosato/ $\text{Ca}^{2+}$  disminuye, es decir, existen muchos más iones calcio disponibles para reaccionar con el glifosato. Lo mismo ocurre cuando empleamos dosis bajas de glifosato ya que, independientemente de que la dosis empleada sea por sí misma letal, la cantidad de moléculas de glifosato a "neutralizar" por el calcio es menor (figuras 4 y 5).

Por último, ciertas hormonas, en concreto las sales sódicas, aminas y los ésteres butoxietílicos del 2,4-D, reducen la penetración y el transporte del glifosato. El mecanismo no está del todo comprendido, aunque también parece estar relacionado con la sustitución del grupo isopropilamino de la molécula de herbicida por otros cationes que forman sales de glifosato con menor capacidad de penetración (Nalewaja y col., 1992).

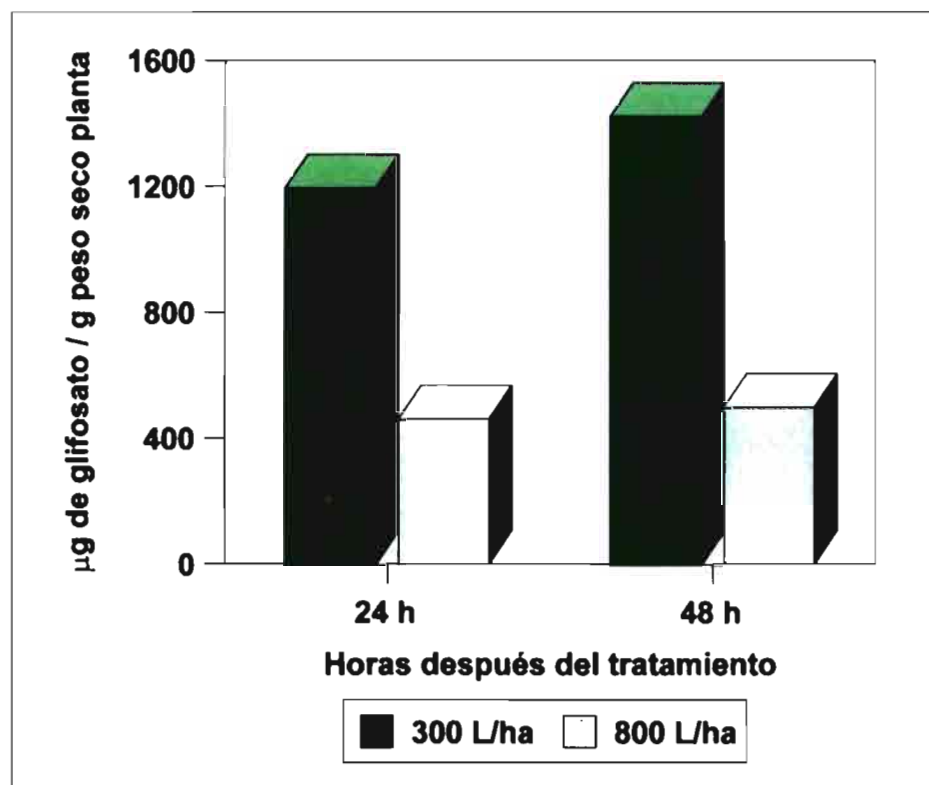
En resumen, las condiciones de aplicación que favorecen la acción del herbicida glifosato son:

- El empleo, cuando sea necesario, de mojanter iónicos derivados de aminas etoxiladas. En el caso de que esto no sea posible, usar mojanter tipo Agral.
- El uso de aguas con pH neutro-ácido y bajo contenido en cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ). En el caso de que esto no sea posible, adicionar al caldo de tratamiento un 1% (peso/volumen) de sulfato amónico.
- Los tratamientos a bajo volumen (<400 L/ha). En el caso de que esto no sea posible, es recomendable emplear sulfato amónico aún cuando la calidad del agua sea buena.
- El empleo de sulfato amónico siempre que mezclamos el glifosato con 2,4-D en forma de sales sódicas aminas y ésteres butoxietílicos.

#### BIBLIOGRAFIA

- Barralis, G., Chadeuf, R., Dufour, J-L. y Gauvrit, C. 1990. Selectivité de plusieurs espèces de raygras à différentes formulations de glyphosate. 14<sup>e</sup> Conf. COLU-MA, Versailles, 23-24 janvier, pp. 181-188.
- Caseley, J. C. 1989. Variations in foliar pesticide performance attributable to humidity, dew and rain effects. *Aspects Appl. Biol.*, 21: 215-225.
- Coupland, D. 1984. The effects of temperature on the activity and metabolism of glyphosate applied to rhizome fragments of *Elymus repens* (= *Agropyron repens*). *Pestic. Sci.* 15: 226-234.
- Gauvrit, C. 1996. Efficacité et sélectivité des herbicides. p.158. INRA Editions, Paris.
- González-Gutiérrez, J. y De Prado, R. 1998. Phytotoxicity of different glyphosate formulations in simazine-resistant and -susceptible *Lolium rigidum* biotypes. *Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent* 63/2a: 303-308.
- Menéndez, J. y De Prado, R. 1996. Penetration, translocation and phytotoxicity of five glyphosate formulations in chlorotoluron-resistant and -susceptible biotypes of *Alopecurus myosuroides* Huds. En "Proceedings of the International Symposium on Weed and Crop resistance to herbicides" (R. De Prado, J. Jorrín, L. García-Torres y G. Marshall, Eds.), pp. 253-254. Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Nalewaja, J. D., Devilliers, B. y Matysiak, R. 1996. Surfactant and salt affect glyphosate retention and absorption. *Weed Res.* 36: 241-247.
- Nalewaja, J. D. y Matysiak, R. 1992. 2,4-D and salt combinations affect glyphosate phytotoxicity. *Weed Technol.* 6: 322-327.
- Thelen, K. D., Jackson, E. P. y Penner, D. 1995. The basis for the hard-water antagonism of glyphosate activity. *Weed Sci.* 43: 541-548.

## Vigilar la calidad del agua de la solución herbicida



**Figura 5.** Cantidad de glifosato presente en el interior de plantas de *Lolium rigidum* tratadas en postemergencia con una formulación a base de glifosato y diflufenican, a una dosis de 672 g m.a. glifosato/ha y a bajo (300 L/ha) y elevado (800 L/ha) volumen de aplicación. Los datos son medias de tres experimentos.

(Fuente: Grupo de Herbicidas de la Universidad de Córdoba).