

DINÁMICA DEL GLIFOSATO EN EL SUELO Y SU POTENCIAL ACTIVIDAD VÍA ABSORCIÓN RADICULAR

Kogan, Marcelo¹,
Alister, Claudio¹

RESUMEN

Glifosato (ácido N-fosfono-metil glicina) es el plaguicida de mayor volumen de venta en el mundo. Se trata de un herbicida, no selectivo, sistémico, aplicado al follaje y que es difícilmente metabolizado por las plantas. Sus propiedades físico-químicas son muy distintivas de la mayoría de los otros herbicidas. La molécula de glifosato es fuertemente adsorbida en el suelo, y a la vez es degradada rápidamente y se piensa que debido a ello no estaría disponible en la solución suelo para ser absorbido vía radicular por las diversas especies, tanto cultivos como malezas. Según algunos autores, la rápida adsorción a óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, y a la materia orgánica prácticamente elimina el riesgo de absorción radicular. Sin embargo hay evidencias en las que glifosato ha mostrado una cierta actividad en el suelo y en los últimos años se ha visto que el glifosato ha sido exudado por malezas y absorbido por otra especie cultivada con la que crecía conjuntamente. Por otro lado, se ha demostrado que para que glifosato produjera igual daño se requería de mayor cantidad al ser absorbido vía raíces que por vía foliar, postulándose que en el apoplasto, el glifosato formaría complejos con los cationes presentes en solución, reduciéndose su actividad, en cambio en el floema no se formarían los complejos glifosato-catión. Como conclusión de esta revisión se puede indicar que la adsorción y degradación en el suelo, son fenómenos que solamente ayudarían a reducir la cantidad del herbicida disponible en la solución suelo para ser absorbido. Así, la nula o mínima actividad del glifosato en el suelo se debería principalmente a su intrínsecamente baja toxicidad cuando es absorbido vía raíces, en comparación a la absorción foliar.

Palabras clave: adsorción, degradación, exudación radicular, persistencia, TD50.

ABSTRACT

Glyphosate Soil Dynamic and its Potential Activity by Roots Absorption

Glyphosate (N-phosphono methyl glycine acid) is the most sold pesticide worldwide. It is a non-selective, systemic foliar applied herbicide and is difficultly metabolized by plants. Its physico-chemical properties are very unique, thus glyphosate molecule is strongly adsorbed in the soil and degraded by microorganism. It is generally accepted that these two phenomenon made that glyphosate is not available in soil solution to be absorbed via root. According to some researchers its rapid soil adsorption to Fe and Al (oxides and hydroxides) in the clay, and to organic matter practically eliminates the risk of root uptake. Nevertheless there are evidences that show glyphosate soil activity, and in the last years reports have shown that glyphosate had been exuded from foliar treated weeds to the soil and absorbed by crop plans that grew together. On the other hand, it has been demonstrated when glyphosate is root absorbed it is required a much larger amount to produce the same level of toxicity compare to foliar uptake, indicating that glyphosate would form complex with cations in solution in the apoplast, reducing herbicide activity, but would not react with cations while translocate in the phloem. As a conclusion of this review it can be said that soil adsorption and degradation will only help diminishing the amount available in soil solution to be absorbed and the minimum or no glyphosate soil activity will be due mainly to its low intrinsic toxicity when is root absorbed.

Key words: adsorption, degradation, DT₅₀, persistence, root exudation

¹Universidad de Viña del Mar. Escuela de Ciencias Agrícolas. Viña del Mar, Chile. Correos electrónicos: mkogan@uvm.cl; calister@uvm.cl

INTRODUCCIÓN

El glifosato fue introducido a mediados del año 1971 y actualmente es el plaguicida de mayor volumen de venta en el mundo.

Glifosato (ácido N-fosfono-metil-glicina) es un herbicida no selectivo, que se aplica al follaje de las malezas y presenta gran movilidad dentro de la planta, principalmente en el floema, siendo difícilmente metabolizado. Presenta un amplio espectro de control y baja toxicidad en mamíferos.

El mecanismo de acción de glifosato es único entre los diferentes grupos de herbicidas y consiste en la inhibición de la síntesis de los aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina y triptófano), lo cual altera la producción de proteínas y previene la formación de compuestos secundarios como la lignina.

El glifosato ejerce su acción (sitio primario de acción) inhibiendo a la enzima 5-enolpirulvil shiquimato 3- fosfato sintasa (EPSPS), la cual se codifica en el núcleo y actúa en el cloroplasto y forma parte de la ruta del ácido shiquímico.

La enzima EPSPS cataliza la reacción entre shiquimato – 3 – fosfato (S3P) y fosfoenolpiruvato (PEP) para formar 5 – enolpirulvil shiquimato – 3 – fosfato (EPSP) y fósforo inorgánico (Pi). Glifosato actúa como inhibidor competitivo de EPSPS con respecto al PEP, pero como un inhibidor no competitivo con respecto a S3P. Mecánicamente, S3P forma un complejo con EPSPS al cual glifosato se acopla antes que PEP. Así, se ha considerado que glifosato participa como un estado análogo de transición de PEP. Glifosato interactúa con la región del sitio activo de la enzima, que une al grupo fosfato del PEP.

Este herbicida se caracteriza por presentar muy baja o casi nula actividad en el suelo, que para fines prácticos se considera que no la tiene. A pesar de ser un herbicida hidrófilo su adsorción en el suelo es elevada y su potencial de lixiviación muy reducido.

Además, se considerara que es rápidamente degradado en el suelo. En general estas últimas características se usan para

justificar por qué glifosato no presenta actividad herbicida en el suelo.

PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS

El comportamiento del glifosato es muy peculiar y distinto a la mayoría de los plaguicidas, debido a sus propiedades físico – químicas.

Es un herbicida de alta solubilidad en agua (10.500 ppm, medido a pH 7), y por ello de una muy baja lipofiliidad ($\log k_{ow} = -3,2$) lo que indica una baja tendencia a ser bioacumulado y presenta baja presión de vapor (3×10^{-7} mm Hg a 25 °C). Con relación a su estabilidad frente a reacciones de hidrólisis y fotólisis, se le considera como un producto estable, en un rango de pH de 4 y 9. Sin embargo, en medios acuosos su vida media (TD_{50}) se ubica en torno a 1,3 – 4,8 días (Degenhardt *et al.*, 2012; PPDB, 2013).

El glifosato corresponde a un aminoácido fosforado, y al igual que su precursor (glicina) se comporta como un «zwiterion», así según el pH del medio presentará cargas positivas y negativas en su estructura.

Normalmente, entre valores de pH 4,5 a 6,5, se produce un balance de una a dos cargas negativas originadas en el grupo fosfórico y carboxílico. Tanto en el estado sólido como en solución las formas iónicas del glifosato son las predominantes. Debido a su condición de «zwiterion», en determinadas condiciones puede presentar capacidad de intercambio aniónico o catiónico, con separación de las dos cargas en pH neutro (+ en grupo amino y el grupo fosfonato y carboxílicos).

La literatura indica que los valores de pK son: pK_1 0,8 (amina); pK_2 =2,16 (fosfórico); pK_3 : 5,46 (carboxílico); pK_4 : 10,14 (fosfórico) (Junior *et al.*, 2002 citado por Luchini, 2009). El glifosato por debajo de pH 2 presenta carga positiva; de pH 2 a 2,32, presentaría carga cero, y por arriba del pH 2,32 carga negativa, que aumenta con el incremento del pH. Mayor información se encuentra en Luchini (2009) y Reginato (2009).

DINÁMICA DEL GLIFOSATO EN EL SUELO

Es importante considerar que todos los plaguicidas después de su aplicación llegan directa o indirectamente al suelo y su destino dependerá en gran medida de su dinámica en el suelo, o sea, de su potencial adsorción (disponibilidad), y de su persistencia en el suelo (degradación, lixiviación, etc.).

PERSISTENCIA – DEGRADACIÓN

La persistencia del glifosato en el suelo no es fácil de predecir, ya que no se trata de una característica intrínseca del herbicida, sino que es controlada por factores propios del herbicida, del suelo y de las condiciones ambientales, y por ello puede variar de un lugar a otro y en un mismo lugar de un año a otro.

El principal proceso involucrado en la persistencia de glifosato, como en otros plaguicidas, es la degradación biológica. Algunos piensan que el glifosato es co-metabolizado por microorganismos del suelo, o sea no hay beneficio para los microorganismos en la reacción en términos energéticos (Sprinkle *et al.*, 1975b). En la actualidad se acepta el hecho de que los microorganismos usan al glifosato como fuente de energía y fósforo (Dick & Quinn, 1995). Ya en 1982, Roslycky había demostrado incrementos en Actinomycetes y bacterias en el suelo con concentraciones $>1000 \mu\text{g ia g}^{-1}$, lo que se entendió como el resultado de la utilización del glifosato como sustrato. En 1983, Moore *et al.*, correlacionaron la tasa de mineralización con el tamaño de la población de *Pseudomonas spp*, las que usaron la porción fosfato de la molécula como fuente de fósforo.

De la misma forma Araújo (2002), citado por Galli y Montezuma (2005) observó un aumento de la actividad microbiana después de la aplicación de 2,16 ppm, de ácido equivalente. Hongos Actinomicetes presentaron aumento de la población. Sin embargo las

baterías no variaron, durante los 32 días del trabajo. Por su parte, Pitelli (2003), citado por Galli y Montezuma, 2005, muestra que al agregar glifosato al suelo se incrementa la actividad microbiana, medida a través de la evolución de CO₂ desde el suelo. Así, en la Figura 1 se muestran la respuesta de los microorganismos del suelo que utilizan la molécula del glifosato y que aparentemente son favorecidas por el incremento de la dosis del herbicida, pudiéndose inferir que ocurre una disipación relativamente rápida del glifosato.

El primer metabolito, producto de la degradación microbiológica es el ácido amino metilfosfónico (AMPA) (Rueppel *et al.*, 1977), además de otros metabolitos de menor importancia, que no representan más del 1% del glifosato aplicado. Algunos metabolitos secundarios son el ácido N-metilaminometilfosfónico, glicina, ácido N, N – dimetilaminometilfosfónico, ácido hidroximetilfosfónico y otros no identificados (Rueppel *et al.*, 1977).

En la actualidad se reconocen dos rutas en la degradación del glifosato, siendo la principal la que origina AMPA, y una secundaria que produce sarcosina (Dick y Quinn, 1995). AMPA es también degradado por microorganismos del suelo (Rueppel *et al.*, 1977), pero es más lenta que la del glifosato, lo que podría reflejar una adsorción más fuerte.

Cuando se habla de la degradación de los herbicidas normalmente se usa como parámetro de comparación a la Media Vida o TD₅₀. Normalmente los valores TD₅₀ se obtienen en trabajos de laboratorio, incubando suelo con el herbicida, y por ello es difícil extrapolar esos valores a las diversas condiciones de campo. Normalmente en las condiciones de campo se deberían esperar menores valores para el TD₅₀ que en los estudios de laboratorio (Cuadro 1).

Como se puede ver, en algunos casos, la tasa de degradación no es muy rápida y por ello la inactivación de este herbicida, observada en algunos suelos, puede ser sólo parcialmente dependiente de su remoción a través de la degradación.

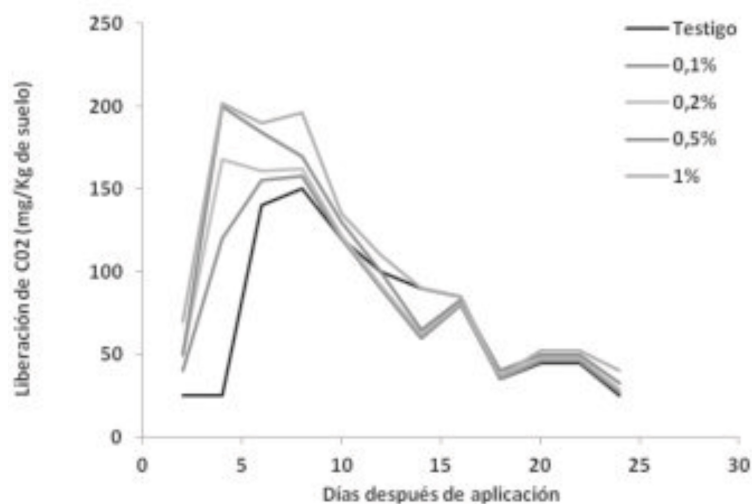


Figura 1. Efecto de la incorporación de diferentes concentraciones de glifosato sobre la actividad respiratoria de un suelo Latossolo rojo-oscuro, de textura media, en condiciones de laboratorio. Pitelli (2003), adaptado de Galli y Montezuma (2005)

Cuadro 1. Rango de días reportados, en literatura y bases de datos, respecto a la degradación (laboratorio) y disipación (campo) de glifosato

Condición	Tiempo de disipación (rango en días)*	
	TD ₅₀	TD ₉₀
Laboratorio	3 - 200	16 - 280
Campo	5 - 21	3 - 365**

*Hance, 1976; Rueppel *et al.*, 1977; Torstensson and Stark, 1981; European Comission, 2002. PPDB, 2013.

**Sobre 365 días.

DISPONIBILIDAD DEL GLIFOSATO EN EL SUELO

Si el glifosato está disponible en el suelo significa que estará sujeto a la acción de los microorganismos, y a ser absorbido por las raíces de las plantas, tanto malezas como por las especies cultivadas. Además podría presentar una cierta lixiviación.

La adsorción del glifosato regula la disponibilidad de este en el suelo. Desde los inicios de la era del glifosato, se consideró que el fenómeno de adsorción era el responsable de la escasa o nula actividad que presentaba dicho herbicida en el suelo (Sprankler *et al.*, 1975b; Moshier *et al.*, 1976; Hensley *et al.*, 1978).

El fenómeno de adsorción del glifosato es rápido y ocurre principalmente a través de la fracción fosfórica del compuesto, que compete por sitios de adsorción con el fósforo inorgánico. El fósforo inorgánico excluye al glifosato de los sitios de adsorción (Hance, 1976). De ahí que la capacidad de adsorción está correlacionada con la capacidad de adsorción de fosfatos de los sitios no ocupados en el suelo (Hance, 1976; Kogan *et al.*, 2003). Se ha visto que la adición de fosfatos al suelo disminuye la adsorción del glifosato, si existen sitios libres (Cuadro 2). En general la adsorción del glifosato no está ligada a la capacidad de intercambio del suelo (arcillas), pero sí con los cationes que se encuentran en las arcillas (Hensley *et al.*, 1978).

Cuadro 2. Relación entre la capacidad de adsorción de fósforo de un suelo y la adsorción de glifosato (Adaptado de Kogan *et al.*, 2003)

Suelo	Fósforo en solución ($\mu\text{g } 100 \text{ mL}^{-1}$)	Sitios ocupados por fósforo ($\mu\text{g } \text{g}^{-1}$)	Capacidad total de retención de fósforo ($\mu\text{g } \text{g}^{-1}$)	K_d ($\text{mL } \text{g}^{-1}$)
Chicureo	2.130	274,8	354,0	3,71
Valdivia	140	1,6	602,4(1)	12,13
Clarillo	2.650	478,0	552,5	16,67

(1)Capacidad máxima de acuerdo a la mayor concentración utilizada en el experimento.

ABSORCIÓN RADICULAR DE GLIFOSATO DESDE EL SUELO

Dado los antecedentes que se han presentado previamente con relación al comportamiento del glifosato en el suelo, es posible entonces pensar que el herbicida podría estar en mayor o menor concentración en la solución suelo, y disponible por periodos variables según las condiciones, disponible para ser absorbido vía raíces por malezas y especies cultivadas. Haderlie *et al.* (1978), Penn y Lynch (1982) ya habían demostrado que plantas que crecían en solución nutritiva que contenía glifosato, absorbían y movilizaban al herbicida a distintos puntos dentro de la planta.

Galli y Montezuma (2005), basados en trabajos de adsorción en suelos brasileros a los óxidos e hidróxidos de fierro y aluminio y a la materia orgánica (Prata *et al.*, 2000), postulan que ese hecho prácticamente elimina el riesgo de absorción radicular de la molécula de glifosato, al usar las dosis normalmente recomendadas. Incluso, altas dosis de glifosato (56 kg ha^{-1}) aplicadas al suelo, que escapan a cualquier recomendación, no produjeron efecto en plantas de trigo (*Triticum aestivum*) tanto en un suelo franco como en uno muy rico en materia orgánica (Sprankle *et al.*, 1975a). Sin embargo, también existen evidencias que indicarían una cierta actividad del glifosato en el suelo. Así, Salazar y Applebay (1982) observaron que plantas de *Agrostis tenuis* sufrieron fitotoxicidad al sembrarlas en un suelo que había sido asperjado con $3,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato. Varios años antes, Baird *et al.* (1972) indicaban que para causar fitotoxicidad, a varias especies, con aplicaciones al suelo era necesario dosis de glifosato de 8 a 32 kg ha^{-1} .

Por otro lado, en la literatura existe un número importante de trabajos en los que el glifosato ha sido exudado al suelo a partir de plantas tratadas y desde ahí absorbido por las raíces de otras especies. Se mencionarán algunos de los trabajos que servirán de base para continuar con el análisis y aproximarse a dilucidar cuán importante puede ser la absorción radicular del glifosato.

Rodríguez *et al.* (1982) mostraron que plantas de trigo tratadas con glifosato exudaron glifosato al suelo, causando inhibición del crecimiento de la raíz y síntomas de fitotoxicidad en hojas del maíz que crecía en el mismo suelo. El trabajo de Tuffi Santos *et al.* (2007) presenta resultados concluyentes a este respecto. Ellos hicieron crecer clones de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) en conjunto con braquiaria (*Braquiaria decumbens*), en dos tipos de suelo (arenoso y arcilloso). Una vez que las plantas de eucalipto y braquiaria alcanzaron una altura de 52 y 43 cm respectivamente, le aplicaron ^{14}C - glifosato a las plantas de braquiaria. Como se puede ver en la Figura 2, el glifosato radioactivo se encontró en todas las plantas de eucalipto, en especial en las hojas, independiente del clon, del suelo y del momento de evaluación. Estos resultados muestran claramente que tiene que haber existido exudación del glifosato al suelo y desde ahí absorción del herbicida o de sus metabolitos, por las raíces de la plantas de eucalipto. Es interesante destacar dos hechos, como resultado de este trabajo: 1) que las mayores concentraciones de ^{14}C -glifosato se encontraron en las plantas de eucalipto que crecieron en el suelo arenoso, y 2) que no se verificó ningún síntoma de fitotoxicidad debido a glifosato, en las plantas de eucalipto que absorbieron el herbicida a través de sus raíces.

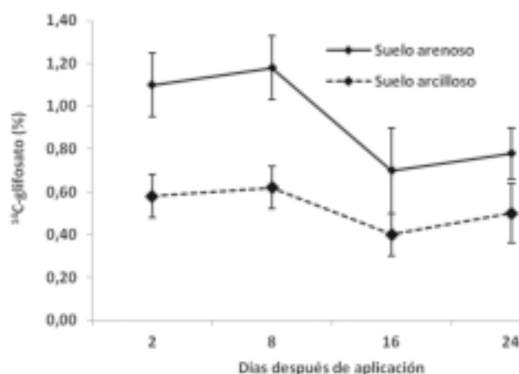


Figura 2. Porcentaje de absorción del ^{14}C -glifosato (%) por plantas de eucalipto, en dos tipos de suelo, después de ser aplicado sobre braquiara. (Adaptado de Tuffi Santos *et al.* 2007)

De igual forma Vivian *et al.* (2007), realizaron un trabajo similar al anterior en cuanto a objetivos, pero en este caso las plantas de braquiaria que crecieron en conjunto con las de eucalipto se asperjaron con dosis equivalentes a: 1,44; 2,88; y 5,76 Kg ia ha⁻¹. Se tomaron todas las precauciones del caso para que, ni las plantas de eucalipto ni el suelo recibieran glifosato. A través de determinaciones del ácido shiquímico en raíces y hojas de las plantas de eucalipto, a las 48 y 96 h después de las aplicaciones del glifosato, se pudo concluir que hubo exudaciones de glifosato desde las plantas de braquiaria al suelo, y que desde la solución suelo este herbicida fue absorbido por las planta de eucalipto. Nuevamente no se observaron efectos detrimentales en las plantas de eucalipto, en cuanto a altura y diámetro, ni efectos negativos en el proceso de fotosíntesis.

En ambos trabajos, recientemente discutidos, se llega a la conclusión de que posiblemente la cantidad de glifosato absorbida por las raíces del eucalipto, en las condiciones de los estudios, fue pequeña y por ende incapaz de causar intoxicación e interferir con el normal crecimiento de las plantas.

Considerando todo lo expuesto hasta este momento, queda claro que si bien es cierto el glifosato se adsorbe con facilidad en el suelo, podría estar disponible en la solución

para ser absorbido por las raíces. De hecho su adsorción, medida a través de su coeficiente de adsorción (K_d : 5,3 a 810 ml g⁻¹), en muchos casos son muy similares a los de otros herbicidas, que sí tienen actividad en el suelo como diuron (K_d : 3,5-15,6 mL g⁻¹) (Hance, 1976), y otros como isoxaben (K_d : 6,4-12,6 mL g⁻¹), pendimetalina (K_d : 91-354 mL g⁻¹) y oxyfluorfen (K_d : 8,5 a 228 mL g⁻¹), sugiriendo que el glifosato podría estar disponible en el suelo y así ser absorbido vía raíces. También su degradación en el suelo no es tan rápida como se podría pensar, con valores de TD_{50} muy variables, según sean las condiciones (Cuadro 1).

Desde hace bastante tiempo ya se pensaba que la falta de actividad del glifosato en el suelo podía deberse a una combinación de factores, incluyendo a la adsorción, degradación y a su intrínseca baja toxicidad cuando el herbicida es absorbido vía raíces (Hance, 1976). Concentrándose en este último punto, o sea, la intrínseca baja toxicidad cuando el glifosato es absorbido vía raíces. Alister *et al.* (2005) realizaron una investigación usando ^{14}C -glifosato, con el objeto de comparar: 1) la distribución del glifosato en la planta luego de absorción radicular y foliar, 2) la movilización del glifosato desde raíces y follaje como función de la cantidad absorbida, y 3) el efecto herbicida.

Para los estudios de la absorción radicular, plántulas de maíz de 6 días después de germinadas, fueron transferidas a cilindros de vidrio graduados (100 mL) que contenían soluciones de ^{14}C -glifosato a las siguientes concentraciones: 0, 2, 4, 10, 15 y 30 mg e. a L⁻¹. Las concentraciones fueron elegidas en base trabajos preliminares, para determinar el efecto de ellas en el crecimiento de las plántulas de maíz. Después de 26 horas de exposición de las raíces a las soluciones con glifosato, se determinó el volumen transpirado y las plántulas se removieron de los cilindros con solución radiactiva. Las raíces de cada plántula se lavaron en agua destilada (100 mL) y luego fueron transferidas a cilindros de vidrio de 250 mL, que contenían una nueva y aireada solución nutritiva y así permanecieron por cinco días en una cámara de crecimiento. Después fueron cosechadas,

separadas y pesadas (semillas, raíces, cotiledón, coleoptilo, primera hoja, y hojas nuevas o ápice).

Con relación a la absorción foliar, las plántulas de maíz, de 6 días luego de germinadas, fueron transferidas también a cilindros de vidrio (100 mL) que contenían agua destilada. La plántulas de maíz recibieron una gota de 2,5 mL de diferentes concentraciones ¹⁴C-glifosato (125,250, 500, 750 y 1000 mg e.a L⁻¹). La aplicación de la gota de las diferentes concentraciones que contenían el herbicida radioactivo se realizó en el extremo distal de la superficie adaxial de la primera hoja. El volumen de la gota y las concentraciones de ¹⁴C-glifosato fueron seleccionadas a partir de experimentos preliminares. Después de la aplicación, las plántulas permanecieron por 26 h en los cilindros que contenían agua destilada. A continuación la hoja tratada se lavó con 20 mL de agua destilada, para recuperar el herbicida remanente en la superficie de las hojas y después fueron transferidas a cilindros de vidrio graduados (250 mL) que contenían una nueva y aireada solución nutritiva. Permaneciendo así por 5 días en una cámara de crecimiento. Después, las plántulas fueron divididas en diferentes partes, como ya se describió. Los resultados mostraron que:

1. Cuando el glifosato fue absorbido por las raíces el 12 % del glifosato se acumuló

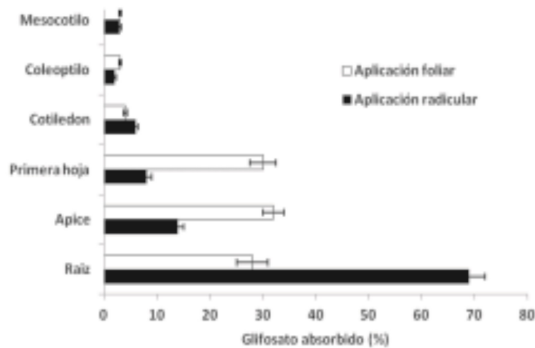


Figura 3. Distribución del ¹⁴C-glifosato en plántulas de maíz después de ser aplicado en la raíz o a la primera hoja. Valores corresponden a la media ± error estándar. (Adaptado Alister *et al.*, 2005).

en el ápice de la parte aérea, comparado con un 32% cuando fue aplicado al follaje. Un 69 % permaneció en las raíces luego de la exposición radicular, comparado con sólo un 28% que permaneció en la hoja tratada, luego de la aplicación foliar (Figura 3).

2. Se observó una estrecha relación entre la cantidad de ¹⁴C-glifosato absorbido y movilizado a distancia desde los puntos de aplicación. Un 36% y un 65% del glifosato absorbido se movilizó desde las hojas y raíces, respectivamente, al resto de las planta (Figura 4).

3. Al considerar a la plántula de maíz como un todo se pudo determinar que la cantidad de ¹⁴C-glifosato para producir un 50% de disminución del crecimiento, cuando fue

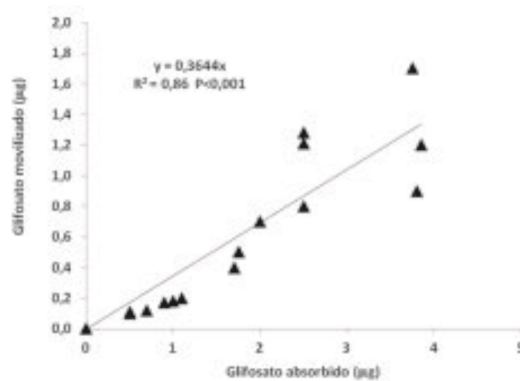
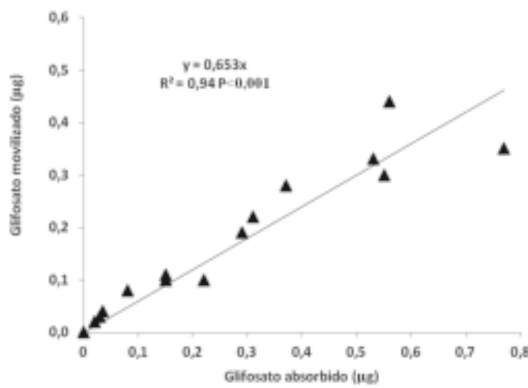


Figura 4. Relación entre la cantidad de glifosato encontrado en los tejidos no aplicados respecto a la cantidad total absorbida por (A) aplicación foliar y (B) aplicación radicular. (Adaptado Alister *et al.*, 2005).

absorbido por las raíces fue de 0,75 mg e.a g⁻¹, en comparación con 0,028 mg e.a g⁻¹ cuando el ¹⁴C-glifosato fue absorbido por las hojas (Cuadro 3).

Una relación similar se observó cuando la cantidad de glifosato acumulada en el ápice de crecimiento se relacionó con la biomasa total de las plantas. (Cuadro 3). En este caso 0,26 mg e.a g⁻¹ de ¹⁴C-glifosato en el ápice, produjo una reducción de un 50% de la biomasa cuando el herbicida fue absorbido a través de las raíces, en cambio se requirió seis veces menos ¹⁴C-glifosato (0,042 mg e.a g⁻¹) para producir el mismo efecto, cuando glifosato fue absorbido por la hojas.

Cuadro 3. Dosis para lograr una reducción del 50% del crecimiento de las plántulas de maíz (RC₅₀), dependiendo si el ¹⁴C-glifosato se aplicó a la raíz o al follaje. Valores corresponden a la estimación de una regresión log-logística. Adaptado Alister *et al.* (2005)

Lugar aplicación ¹⁴ C-glifosato	RC ₅₀ ⁽¹⁾ (µg a.e. g ⁻¹)
Raíz	0,75 ± 0,06
Primera hoja	0,028 ± 0,005

⁽¹⁾RC₅₀=Dosis para lograr un reducción de un 50% del crecimiento de la planta respecto al testigo no tratado.

Estos resultados confirman el hecho de que el glifosato es menos activo, por lo menos en este caso, cuando es absorbido vía raíces. La razón de este fenómeno no está aún clarificada. Sin embargo, es sabido que el glifosato puede reaccionar con cationes presentes en la solución del xilema (De Ruiter *et al.*, 1996). Esto debido a que el glifosato forma complejos glifosato-catión con Fe⁺³, Al⁺³, Mg⁺², Mn⁺², Zn⁺², Ca⁺², Co⁺³, Cu⁺², entre otros, que se encuentren en el agua. (Sprankle *et al.*, 1975; Hensley *et al.*, 1978; Glass, 1987), lo cual puede reducir su actividad (Nilsson, 1985; Hall *et al.*, 2000). Sin embargo, cuando el glifosato es movilizado en el simplasto puede que no se formen complejos glifosato-catión, ya que los cationes presentes en el floema están generalmente formando complejos con otros compuestos orgánicos (Taiz, 2000), y por ello pueden estar

menos libres para reaccionar con glifosato, explicando la mayor toxicidad cuando glifosato es absorbido vía foliar. Incluso debido al pH alcalino del simplasto (floema), el glifosato es convertido en sales solubles, las que se mueven en el flujo junto con los carbohidratos (Franz, 1985).

Como conclusión final de esta revisión se puede corroborar que la mínima o nula actividad en el suelo del herbicida glifosato se debería principalmente a la adsorción y degradación en el suelo, fenómenos que ayudarían a reducir la cantidad de herbicida disponible en la solución del suelo, y a una toxicidad intrínsecamente baja del glifosato cuando absorbido vía radicular.

BIBLIOGRAFÍA

- ALISTER, C.; KOGAN, M.; PINO, I.** 2005. Differential phytotoxicity of glyphosate in maize seedlings following applications to roots or shoot. *Weed Res.* 45: 27-32.
- ARAÚJO, A.S.F.; MONTIERO, R.T.R.; ABARKELI, R.B.** 2003. Effect of glyphosate on the microbial activity of the Brazilian soils. *Chemosphere* 52: 799-804.
- BAIRD, D.D.; UPCHURCH, R.P.; SELLECK, E.W.** 1972. Phosphonometyl glycine, a new broad spectrum, pots emergence herbicide. In California Weed Conference (24., 1972, California, USA). *Proceedings.* p 94-98.
- DEGENHARDT, D.; HUMPHRIES, D.; CESSNA, A.J.; MESSING, P.; BADIOU, P.H.; RAINA, R.; FARENHORST, A.; PENNOCK, D.J.** 2012. Dissipation of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in water and sediment in two Canadian prairie wetlands. *J. of Envir. Sci. and Health. Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Waste*, 7,631- 639.
- DE RUTIER, H.; UFFING, A.; MEINEN, E.** 1996. Influence of surfactant and amoniumsulphate on glyphosate phytotoxicity to quackgreass (*Elytrigia repens*) *Weed Tech.* 10: 803-808.
- DICK, R.E.; QUINN, J.P.** 1995. Glyphosate-degrading isolates from environmental samples occurrence and pathways of degradation. *Appl. Microb. and Biotec.* 3: 545-550.

- EUROPEAN COMMISSION.** 2013. Consultado 13 ene 2013. Disponible en http://ec.europa.eu/food/plant/protection/evaluation/existactive/list1_glyphosate_en.pdf.
- FRANZ, E.J.** 1985. Discovery, development and chemistry of glyphosate. In E. Grossbard; D. Atkinson eds. *The Herbicide Glyphosate*. London, Butterworth, UK. p. 3-17.
- GALLI, A.J.B.; MONTEZUMA C.M.** 2005 Glifosato: algunos aspectos da utilizacao do herbicida glifosato na agricultura. ACADCOM Gráfica e Editora Ltda. 66p.
- GLASS, R.** 1987. Adsorption of glyphosate in soils and clay minerals. *J of Agri. and Food Chem.* 35: 497-500.
- GIESY, J.P.; DOBSON, S.; SOLOMOM, K.R.** 2000. Ecotoxicological risk assessment for roundup herbicide. *Rev. Environ. Contamination and Toxicol.* 167:35-120.
- HALL, G.; HART, C.; JONES, C.** 2000. Plants as sources of cations antagonistic to glyphosate activity. *Pest Manag. Sci.*, 56: 351-358.
- HANCE, R.** 1976. Adsorption of glyphosate by solis. *Pesticide Sci.* 7, 363-366.
- HADERLIE, L.C.; SLIFE, F.W.; BUTHER, H.** 1978. ¹⁴C-glyphosate absorption and translocation in germinating maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) seeds and in soybean plants. *Weed Res.* 18:269-273.
- HENSLEY, D.L.; BEUERMAN, D.S.N.; CARPENTER, P.** 1978. The inactivation of glyphosate by various soil sand metal salts. *Weed Res.* 18: 293-297.
- KOGAN, M.; METZ, M.; ORTEGA, R.** 2003. Adsorption of glyphosate in Chilean soils and relationship with unoccupied phosphate binding sites. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 38: 513-519.
- LUCHINI, C.L.** 2009. Consideracoes sobre algumas propiedades físico químicas do glyphosate. In E. Dominguez, DK. Meschede, CA. Carbonari, ML. Bueno Trindale. Eds. *Glyphosate*. Botucatu, Brasil, FEPAF. 409p.
- MOORE, F.K.; BRAYMER, H.D.; LARSON, A.D.** 1983. Isolation of *Pseudomonas* sp. which utilizes the phosphonate herbicide glyphosate. *Appl. and Envir. Microb.* 46, 316-320.
- MOSHIER, L.; TURGEON, A.J.; PENNER, D.** 1976. Effect of glyphosate and siduron on turfgrass establishment. *Weed Sc.* 24, 445-448.
- NILSSON, G.** 1985. Interaction between glyphosate and metals essencial for plant growth. In E Grossbard; D Atkinson. eds. *The Herbicide Glyphosate*. London, Uk, Butterworths. P.35-47
- PENN, D.J.; LYNCH, J.M.** 1982. Toxicity of glyphosate applied to rootof barley seedlings. *New Phytologist*, 90: 51-55.
- PPDB.** 2013. Pesticide Properties Database. Consultado 14 ene 2013. Disponible en <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es/index.htm>.
- PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGINATO, J.B.; TORNISIELO, V.L.** 2000. Influencia da materia organica na sorcao e dessorcao do glifosato em solos com diferentes atributos minerlogicos. *Rev. Bras..Cien. Solo. Vicoso*, 24:947-951.
- REGINATO, B.J.** 2009. Sorcao e degradacao do glyphosate no solo. In E. Dominguez, DK. Meschede, CA. Carbonari, ML. Bueno Trindale. Eds. *Glyphosate*. Botucatu, Brasil, FEPAF. 409p.
- RODRIGUES, J.F.V.; WORSHAM, A.D.; CORBIN, I.** 1982. Exudation of glyphosate from wheat (*Triticum aestivum*) plants and its effects on interplanted corn (*Zea mays*) and soybeans (*Glycine max*). *Weed Sci.* 30:316-320.
- ROSLYCKY, E.B.** 1982. Glyphosate and the response of the soil microbiota. *Soil Biol. Biochem.*, 14: 87-92.
- RUEPPEL, M.L.; BRIGHTWELL, B.B.; SCHAEFER, J.; MARVEL, J.T.** 1977. Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water. *J. Agr. and Food Chem.* 25: 517-528.
- SALAZAR, LC.; APPLEBY, A.P.** 1982. Herbicidal activity of glyphosate in soils *Weed Sci.*, 30: 463-466.
- SPRANKLE, P.; MEGGIT, W.F.; PENNER, D.** 1975a. Rapid inactivation of glyphosate in the soil. *Weed Sc.* 23: 224-228.
- SPRANKLE, P.; MEGGIT, W.F.; PENNER, D.** 1975b. Adsorption, mobility and microbial degradation of glyphosate in the soil. *Weed Sc.* 23: 229-224.

- VIVIAN, R.; GIMENES, M. JR.; DOS REIS, R.A.; SAN MARTIN, A.H.; LABONIA, V.; TEZOTTO, T.** 2007. Potencial fitotóxico de glyphosate em eucalipto a partir da exsudação radicular de Braquiaria.. In CA. Carbonari; DK Mchede, E. Domínguez Velini eds. Simpósio Internacional sobre Glyphosate (2007, Botucatu, SP, Brasil). Fac. Ciências Agronômicas. UNESP. p. 318-321.
- TAIZ, L.** 2002. Assimilation of mineral nutrients. In L Taiz and E Zieger eds. Plant Physiology. Sunderland, Ma, USA, Sinauer Associates. p.259-282.
- TORSTENSSON, L.; STARK, J.** 1979. Persistence of glyphosate in forest soils; weed and weed control. In Swedish Weed Conference (20., 1979, Uppsala) p145-149.
- TORSTENSSON, L.** 1985. Behaviour of glyphosate in soils and its degradation. In E Grossbard; D Atkinson. eds. The Herbicide Glyphosate. London, UK, Butterworths. p. 137-150.
- TUFFI SANTOS, L.D.; TIBURSIO, S.; BARBOSA DOS SANTOS J.; FERREIRA, A.F.** 2007. Exsudação radicular de glyphosate por braquiária e seus efeitos em plantas de eucalipto. In CA. Carbonari; DK. Meschede, E. Domínguez Velini eds. Simpósio Internacional sobre Glyphosate, (2007, Botucatu SP, Brasil Fac. Ciências Agronômicas .UNESP. p.311-313.
- TURKER, D.** 1977. Glyphosate injury symptom expression in citrus. HortScience, 5:498-500.