



Potencial de *Chlorophytum comosum* para la Remediación de Suelos Contaminados con Glifosato

Potential of *Chlorophytum comosum* for the Remediation of Soils Contaminated with Glyphosate

Pedro Sandoval-Estrada^{1,2‡}, Ana Belem Piña-Guzmán², Dioselina Álvarez-Bernal³,
Marina Olivia Franco-Hernández² y Fabián Robles-Martínez²

¹ Tecnológico Nacional de México, ITS de Los Reyes. Carretera Los Reyes-Jacalona km 3, Colonia San Rafael. 60330 Los Reyes de Salgado Michoacán, México; (P.S.E.).

[‡] Autor para correspondencia: pedro.se@losreyes.tecnm.mx

² Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Av. Acueducto, La Laguna Ticomán. 07340 Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México; (A.B.P.G.), (M.O.F.H.), (F.R.M.), (P.S.E.).

³ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Michoacán. Justo Sierra Ote. 28, Centro. 59510 Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México; (D.A.B.).

RESUMEN

El glifosato es un herbicida ampliamente utilizado, pero su uso excesivo ha generado preocupaciones por sus posibles efectos negativos en la salud humana y al ambiente debido a su persistencia en el suelo. La fitoremedación es el uso de la capacidad de las plantas para absorber, acumular y metabolizar contaminantes, se presenta como una alternativa viable y económica para remediar suelos contaminados con glifosato. Por tal motivo, el objetivo principal de la presente investigación es evaluar la capacidad remediadora de *Chlorophytum comosum* (mala madre) en suelos agrícolas contaminados con glifosato. Se realizó un experimento en un invernadero, contaminando intencionalmente un suelo agrícola con glifosato a una concentración de 1.2 ml kg⁻¹ del ingrediente activo glifosato. Se establecieron tres tratamientos: suelo contaminado sin planta (TSx), suelo no contaminado + planta (TM) y suelo contaminado + planta (TMx). Se midieron variables biométricas de las plantas y se determinaron las concentraciones de glifosato y ácido aminometilfosfónico (AMPA) en suelo y tejidos vegetales a diferentes tiempos. *Chlorophytum comosum* cultivada en suelo contaminado (TMx) mostró un mayor desarrollo en altura de la planta y número de hojas, así como mayor biomasa en comparación con las plantas cultivadas en suelo no contaminado (TM). El tratamiento TMx presentó una reducción significativa en las concentraciones de glifosato y AMPA en el suelo a los 180 días, alcanzando una remoción del 100% del glifosato. Se detectó la presencia de AMPA en las raíces de las plantas de TMx. *C. comosum* demostró una notable capacidad de adaptación y tolerancia a suelos contaminados con glifosato y AMPA, aprovechando los compuestos derivados del glifosato como fuente de nutrientes y contribuyendo a su degradación en el suelo. Estos resultados sugieren que *C. comosum* representa una alternativa prometedora para la fitoremedación de suelos contaminados con glifosato.



Cita recomendada:

Sandoval-Estrada, P., Piña-Guzmán, A. B., Álvarez-Bernal, D., Franco-Hernández, M. O., & Robles-Martínez, F. (2025). Potencial de *Chlorophytum comosum* para la Remediación de Suelos Contaminados con Glifosato. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-9. e2010. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2010>

Recibido: 1 de julio de 2024.

Aceptado: 12 de enero de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Marzo de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Víctor Manuel Ruiz Valdiviezo



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

SUMMARY

Glyphosate is a widely used herbicide, but its excessive use has raised concerns about its potential adverse effects on human health and the environment due to its persistence in the soil. Phytoremediation, which utilizes the ability of plants to absorb, accumulate, and metabolize contaminants, is presented as a viable and cost-effective alternative to remediate glyphosate-contaminated soils. Therefore, the main objective of this research was to evaluate the phytoremediation capacity

of *Chlorophytum comosum* (spider plant) in agricultural soils contaminated with glyphosate. A greenhouse experiment was conducted by intentionally contaminating an agricultural soil with glyphosate at a concentration of 1.2 ml kg^{-1} of the active ingredient glyphosate. Three treatments were established: soil contaminated without plant (TSx), soil not contaminated + plant (TM), and soil contaminated + plant (TMx). Plant biometric variables and concentrations of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA), were measured in soil and plant tissues at different times. The *C. comosum* plants in glyphosate-contaminated soil (TMx) showed greater growth in height and number of leaves, as well as greater biomass compared to the plants in uncontaminated soil (TM). The TMx treatment showed a significant reduction in glyphosate and AMPA concentrations in the soil after 180 days, reaching 100% dissipation of glyphosate. AMPA was detected in the roots of TMx plants. *C. comosum* plants showed a remarkable ability to adapt to and tolerate soils contaminated with glyphosate and AMPA, utilizing glyphosate-derived compounds as nutrients source and contributing to their degradation in the soil. These results suggest that *C. comosum* represents a promising alternative for the phytoremediation of glyphosate contaminated soils.

Index words: AMPA, phytoremediation, herbicide, spider plant.

INTRODUCCIÓN

Los plaguicidas son sustancias usadas para prevenir y controlar plagas, enfermedades y malezas en la producción agrícola. Pueden ser aplicados directamente a los cultivos o al suelo y se clasifican por su modo de acción, composición química, toxicidad y forma de aplicación. Sin embargo, estos productos son altamente tóxicos y dañinos para la salud y el medio ambiente debido a su capacidad de disolverse en lípidos y ser altamente volátiles (Díaz y Betancourt, 2018). El uso excesivo de estos productos ha llevado a una disminución en la fertilidad del suelo, lo que afecta negativamente la producción de alimentos y la salud humana y animal (Hernández-Ruiz, Álvarez y Ríos, 2017).

El glifosato es un herbicida altamente eficaz para el control de malezas en la agricultura moderna, pero su uso desmedido ha generado preocupaciones sobre sus posibles efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. El glifosato puede permanecer en el suelo por un largo tiempo y ser transferido a otras plantas no objetivo, esto está fuertemente ligado a las propiedades del suelo, como el potencial de fijación de fósforo, contenido de hierro, pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de arcilla y materia orgánica (González-Ortega y Fuentes, 2022). Al respecto, Salazar-López *et al.* (2016) mencionan que, el glifosato aplicado a las malezas se libera posteriormente en el suelo, lo cual retrasa su concentración y prolonga su vida media en el suelo, por lo que en suelos arenosos, el agua de riego transporta el glifosato a capas más profundas y no existen explicaciones claras de los procesos de disipación en curso. La degradación del glifosato se ha descrito en dos vías: una relacionada con la actividad enzimática sobre el enlace carbono-fósforo (C-P) y la otra es un proceso de oxidación de una enzima glifosato reductasa que rompe el enlace carbono-nitrógeno (C-N) formando el metabolito ácido aminometilfosfónico (AMPA), el cual es más persistente que el glifosato. Las bacterias oxidan o hidrolizan hasta el 98% del glifosato y solo el 9% del AMPA (Primost *et al.*, 2017).

Para la eliminación de residuos de glifosato y su metabolito AMPA del suelo existen múltiples estrategias, entre las cuales destaca la fitoremedición por su eficacia y rentabilidad. Esta técnica aprovecha las capacidades naturales de las plantas y los microorganismos asociados a sus raíces, para degradar o extraer los contaminantes nocivos y persistentes. Su aplicación se extiende tanto a la descontaminación de suelos como a la purificación de cuerpos de agua, ofreciendo una solución ecológica y económicamente viable para la restauración ambiental. Diversas investigaciones han demostrado que las plantas de *Chlorophytum comosum* (mala madre), comunes en hogares y jardines, también tienen potencial para la fitoremedición de ciertos contaminantes. Se ha demostrado que esta planta es capaz de acumular As en sus raíces y en su parte aérea, además de aumentar la actividad de ciertas enzimas en el suelo que son importantes para la biodegradación de contaminantes orgánicos (Lee, Jun y Zahra, 2021). Con base en el potencial biorremediador de dicha planta, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la capacidad remediadora de las plantas de *C. comosum* en suelos agrícolas contaminados con glifosato, como una alternativa para recuperar las propiedades fisicoquímicas del suelo y mitigar los efectos de los residuos del plaguicida.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló en el Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes, en la ciudad de Los Reyes de Salgado, en el estado de Michoacán, en la nave de invernadero "A", ubicada en las coordenadas 19° 36' 52.5" N y 102° 28' 39.6" O, a 1300 m de altitud.

El suelo utilizado para la investigación fue recolectado del rancho "Corona", en el municipio de Los Reyes de Salgado, Michoacán, con las coordenadas 19° 36' 01.8" N y 102° 29' 13.7" O. Se verificó previamente que el suelo no contenía residuos de plaguicidas mediante un análisis de residualidad de plaguicidas por la técnica de HPLC. El suelo es un vertisol con las siguientes propiedades físicas: porosidad total del 53.75%, capacidad de retención de agua del 49.58%, densidad aparente de 1.02 g cm⁻³ y densidad real de 2.2 g cm⁻³. En cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, se registró un porcentaje de materia orgánica del 2.9%, un pH de 8.5 y una conductividad eléctrica de 1.13 decisiemens por metro.

Contaminación del Suelo

La contaminación del suelo se llevó a cabo dentro de un invernadero, se colocó un plástico libre de contaminantes sobre el piso para evitar la contaminación cruzada. Posteriormente, el suelo en estudio se colocó sobre el plástico y se preparó una solución acuosa de glifosato a una concentración de 3 mL del producto comercial "Takle" (que tiene una concentración del 41% del ingrediente activo (i.a.), sal isopropilamina de glifosato) en 1 L de agua. Enseguida, se asperjó el suelo con dicha solución y se mezcló para homogeneizar la humedad y alcanzar una concentración inicial calculada de 1.2 g ^{i.a.} kg⁻¹ suelo. Posteriormente, se tomó una muestra de 1 kg de suelo para determinar analíticamente la concentración inicial del contaminante. Para la preparación y almacenamiento de la muestra, se siguió la metodología establecida en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Material Vegetal

Las plantas de *Chlorophytum comosum* se adquirieron en la primera fase de desarrollo vegetativo, con un promedio de 7 hojas y una longitud aproximada de 7.2 cm. La adquisición se realizó en un vivero certificado, ubicado en la carretera Jiquilpan - Sahuayo km 3.4, La Yerbabuena, Sahuayo de Morelos, Michoacán.

Diseño Experimental

Se realizó un diseño completamente al azar, con un total de tres tratamientos y diez repeticiones cada uno. Los tratamientos fueron: TSx - Suelo contaminado, permitió evaluar la degradación natural del glifosato en el suelo, sin interacción con la planta; TM - Suelo libre de glifosato + planta de *C. comosum*, este tratamiento control permitió evaluar el desarrollo de las plantas en condiciones normales; TMx - Suelo contaminado con glifosato + planta de *C. comosum*, con la finalidad de evaluar la capacidad de las plantas para remover el plaguicida del suelo.

Las variables de respuesta fueron: longitud y número de hojas, y biomasa de las plantas a los 0, 20, 60, 120 y 180 días después del trasplante (ddt). Se estimó la concentración de glifosato y AMPA en suelo y tejidos vegetales a los 0, 20, 90 y 180 días después del tratamiento.

Biomasa de las Plantas

Para medir el peso seco, las plantas se extrajeron de los contenedores evitando su exposición al sol para evitar la deshidratación y, una vez eliminado el exceso de suelo de la parte radicular, las plantas se dividieron en secciones (hojas y raíz). Posteriormente, se acondicionaron en fundas de papel aluminio y se deshidrataron en una estufa con circulación forzada de aire a 65 °C durante 48 horas hasta alcanzar el peso constante y se determinó el peso seco en gramos.

Determinación de Glifosato en Suelo y Plantas

Para las muestras de suelo de cada tratamiento, se extrajo una muestra de cada maceta hasta completar un kilogramo y se mezcló para formar una muestra compuesta. El muestreo se realizó a una profundidad de entre 10 y 20 cm a una distancia de 10 cm de la base de la planta, dividiendo el contenedor en cuatro secciones y tomando aleatoriamente el sector de muestreo. Estas se colocaron en bolsas de plástico herméticas y se llevaron al laboratorio para su preparación adecuada, según lo indica el método AS-01 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Una vez preparada la muestra, se almacenó en refrigeración a una temperatura de 4 grados centígrados.

Para las muestras de las plantas de cada tratamiento se eligió al azar una planta, la cual se extrajo cuidadosamente de la maceta, incluyendo el cepellón radicular, y se eliminó el suelo que envolvía la raíz. Posteriormente, se dividió en sus secciones (hojas y raíz), y se colocaron en una prensa botánica durante 15 días para su secado a temperatura ambiente. Después de este tiempo, se almacenaron en bolsas herméticas hasta proceder con sus respectivos análisis.

Extracción de Glifosato de Suelos

La extracción del glifosato en los suelos se realizó tomando 2 g de suelo pesados en un vidrio reloj, la muestra se transfirió a un tubo de centrífuga de 25 mL y se le añadieron 20 mL de una solución 0.01M de KH_2PO_4 . El tubo se dejó 2 h en agitación a 4000 rpm para homogenizar la muestra y, una vez homogenizada, se llevó por 10 min a la centrífuga a 10000 rpm para acelerar la decantación del suelo y poder tomar la muestra de 400 mL del sobrenadante donde se encuentra el glifosato extraído. Posteriormente, se hizo el proceso de derivatización.

Extracción de Glifosato de Plantas

Una vez colectada la muestra, se molieron y homogenizaron con un molino eléctrico de cuatro cuchillas de acero inoxidable, se pesaron 5 g de cada muestra en un vidrio reloj, luego, cada muestra se transfirió a un tubo de centrífuga de 50 mL, se añadieron 20 mL de agua desionizada, se homogenizaron las muestras en vórtex, seguidamente, se centrifugaron a 5000 rpm por 10 min con la finalidad de decantar la muestra sólida de las plantas. Se agregaron 1.5 mL de agua acidulada y 0.50 mL del sobrenadante de las plantas en tubos de centrífuga de 15 mL y se homogenizaron en vórtex, seguidamente, se tomaron los 400 mL de la muestra para derivatización.

Derivatización

Para la derivatización se utilizó cloruro de 9-fluorenilmetoxicarbonilo (FMOC-Cl) como agente derivatizador. Se tomaron 400 mL de los patrones de glifosato analítico (se modificó por herbicida Takle), seguidamente se le añadieron 700 mL de una solución FMOC-Cl a una concentración de 0.05 M y 400 mL de una solución de buffer de borato de sodio a 0.05 M. Se agitó levemente para homogenizar los reactivos, la reacción se conservó por 12 horas en un frasco ámbar y por último se procedió a analizar por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC-DAD).

Determinación de Glifosato

La determinación del glifosato se llevó a cabo por HPLC equipado con un detector de arreglo de diodos. Para la separación se utilizó una columna Zorbax C-18 (150* 4.6 mm; 5mm) a 40 °C de temperatura, se usó como fase móvil acetonitrilo, agua y 0.05 M de fosfato monopotásico (KH_2PO_4) en una proporción 30:70% con un flujo de 0.7 mL min^{-1} . Se inyectaron 20 mL de patrones y muestras, la lectura se hizo a una longitud de onda de 206 nanómetros.

Para la cuantificación del glifosato y la implementación del método planteado, se realizó una curva de calibración con patrones analíticos de glifosato en un rango de 0-20 mg L^{-1} . La repetitividad y reproducibilidad del método se garantizó realizando las determinaciones por triplicado, la estimación de glifosato y AMPA se realizaron por cuadriplicado. Así mismo, se hizo una validación externa preparando una solución de 20 mg L^{-1} de glifosato comercial Takle (Bernal-Barreto, 2020¹).

Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de este estudio se utilizó un ANOVA con una comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS 9.0 (SAS Institute, 2002).

¹ Bernal-Barreto, E. M. (2020). *Implementación de una Técnica de Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia para Detección de Glifosato en Suelos, Lixiviados, Tomate (*Solanum lycopersicum*) y albahaca (*Ocimum basilicum*)*. Tesis para obtener grado de Licenciatura, Universidad Santo Tomás. Disponible en <http://hdl.handle.net/11634/23204>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de las variables biométricas de una planta es un indicador de las condiciones favorables o desfavorables del medio en el que se desarrolla. La altura de la planta está relacionada con su vigor y salud. En el Cuadro 1 se observa que la longitud de las hojas de *C. comosum* al momento del trasplante (0 ddt) en suelo libre de glifosato (TM) y contaminado con el plaguicida (TMx) no mostró diferencias estadísticas significativas, lo cual indica la igualdad de condiciones para su desarrollo óptimo. Durante los primeros 20 días, en ambos tratamientos las plantas presentaron un aumento en la longitud de sus hojas, lo que sugiere que la presencia de glifosato en el suelo no inhibió su desarrollo, aunque en el suelo contaminado con glifosato las hojas tuvieron una menor elongación. Sin embargo, después de los 60 y hasta los 180 ddt, las plantas de *C. comosum* en el suelo contaminado desarrollaron hojas más largas, presentando diferencias estadísticamente significativas, respecto a las crecidas en el suelo no contaminado.

La degradación de glifosato ocurre mediante la vía C-P liasa, llevada a cabo por bacterias como *Pseudomonas*, *Burkholderia gladioli*, *Flavimonas oryzihabitans*, varias especies de *Bacillus* y bacterias oxidantes del azufre. En este proceso, la enzima C-P liasa rompe el enlace carbono-fósforo, descomponiendo el glifosato en P5-fosforribosil 1-difosfato (PRPP) y sarcosina, que posteriormente se transforman en glicina y formaldehído. Estas moléculas son esenciales para el funcionamiento y crecimiento de las plantas, contribuyendo a la síntesis de compuestos vitales y regulación de rutas metabólicas. La glicina resulta de la degradación de la sarcosina y esta puede ser utilizada en la síntesis de proteínas y otros compuestos nitrogenados esenciales en las plantas, por lo cual puede ser utilizada como una fuente de carbono y nitrógeno, contribuyendo al metabolismo general y al reciclaje eficiente de estos elementos esenciales (Brachhold, 2019). Por lo tanto, el proceso de degradación del glifosato mediante la vía C-P liasa permite la generación de compuestos clave como PRPP, sarcosina y glicina, los cuales contribuyen al crecimiento y metabolismo de las plantas. Estos compuestos no solo sirven como fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también participan en la síntesis de proteínas y otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal. Debido a esta capacidad de reciclaje eficiente de nutrientes en el medio contaminado, las plantas de *C. comosum* presentan una mayor longitud en sus hojas, reflejando una adaptación favorable a las condiciones del suelo afectado por glifosato.

El número de hojas en una planta es fundamental porque está estrechamente relacionado con el área foliar total, un factor clave en el desarrollo vegetal. A mayor cantidad de hojas, se incrementa la superficie foliar, lo cual no solo mejora la captación de luz solar, sino que también amplía la capacidad de la planta para realizar la fotosíntesis y se optimiza la eficiencia de dicho proceso. Esta mayor actividad fotosintética resulta en un aumento en el intercambio de energía con la atmósfera, promoviendo un crecimiento más robusto como resultado de una respiración y transpiración más efectivas, lo que facilita la regulación del agua y los nutrientes. Por lo tanto, una mayor cantidad de hojas permite una mejor respuesta a los procesos de riego y fertilización, contribuyendo al desarrollo general y la salud de la planta (Berdjour et al., 2020).

Al comparar la variable de generación de hojas entre las plantas de los tratamientos TM y TMx a lo largo del experimento, se encontraron diferencias estadísticas significativas desde el inicio del montaje hasta los 120 días después del tratamiento (ddt). No obstante, las plantas cultivadas en suelo contaminado mostraron una producción de hojas que, con el tiempo, tendió a ser mayor. En particular, a partir de los 120 ddt, la generación de hojas en estas plantas se incrementó, resultando en una diferencia estadística no significativa en los 180 ddt (Cuadro 2). Esto sugiere que la contaminación del suelo no tiene un efecto negativo significativo en la cantidad de hojas producidas.

Cuadro 1. Longitud de hojas entre tratamientos (Longitud promedio ± D.E.) en centímetros.
Table 1. Leaf length between treatments (Average length ± S.D.) in centimeters.

Tratamiento	0	20	60	120	180
ddt					
TM	7.2±1.32 a	13.3±1.85 a	17.3±1.05 a	22.8±1.69 b	30.8±1.25 b
TMx	7.1±1.29 a	10.1±1.69 b	18.8±0.89 a	30.3±1.63 a	53.1±1.50 a

TM = planta de *C. comosum* en suelo sin contaminar; TMx = planta de *C. comosum* en suelo contaminado con glifosato. D.E = desviación estándar. Valores con la misma letra en columna no difieren significativamente según Tukey ($P \leq 0.05$).

TM = soil not contaminated + plant of *C. comosum*; TMx = Soil contaminated with glyphosate + plant of *C. comosum*; S.D. = Standard deviation. Values with the same letter in a column do not differ significantly according to Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Comparación del número de hojas entre plantas en medio contaminado y no contaminado (Número promedio de hojas ± D.E.).

Table 2. Comparison of leaf number between plants in contaminated and non-contaminated medium (Average number of leaves ± S.D.).

Tratamiento	0	20	60	120	180
----- ddt -----					
TM	11.7±1.25 a	17.5±1.07 a	22.9±1.10 a	31.7±1.88 a	48.9±2.23 a
TMx	6.8±1.03 b	11.4±1.71 b	16.6±0.95 b	24.3±1.15 b	46.3±0.95 a

TM = planta de *C. comosum* en suelo sin contaminar; TMx = planta de *C. comosum* en suelo contaminado con glifosato. D.E. = desviación estándar. Valores con la misma letra en columna no difieren significativamente según Tukey ($P \leq 0.05$).

TM= Soil not contaminated + plant of *C. comosum*, TMx= Soil contaminated with glyphosate + plant of *C. comosum*, S.D.= Standard deviation. Values with the same letter in a column do not differ significantly according to Tukey ($P \leq 0.05$).

Sin embargo, es importante destacar que las hojas de las plantas en el tratamiento TMx presentaron pérdida de coloración en algunas de ellas. Este hallazgo está en línea con la investigación de (González-Ortega y Fuentes, 2022), quienes indican que el glifosato, al entrar en el sistema metabólico de la planta, puede causar malformaciones en diferentes órganos. El glifosato interfiere con la ruta metabólica del shikimato, inhibiendo la síntesis de aminoácidos aromáticos y afectando varios procesos metabólicos y fisiológicos; este efecto podría explicar la pérdida de coloración observada en las hojas del tratamiento TMx, a pesar de que la cantidad total de hojas generadas no se afectó significativamente por la presencia de glifosato en el suelo.

La medición del peso seco es clave para evaluar su crecimiento y desarrollo, ya que indica la acumulación de biomasa en sus órganos. En estas plantas, la distribución de la materia seca entre hojas y raíces es crucial para su estética y salud. Durante las primeras fases de crecimiento, es esencial que los asimilados producidos en las hojas se destinen principalmente a la expansión foliar, lo que mejora su apariencia y capacidad para captar luz solar. Este proceso, que varía con el tiempo, garantiza un crecimiento vigoroso y una planta ornamental atractiva (Barrientos-Llanos, Castillo-Gutiérrez y García, 2015). Al analizar los diferentes tratamientos, se destaca que las plantas ubicadas en suelos contaminados exhibieron un peso seco superior (Figura 1). Este hallazgo sugiere la notable capacidad de adaptación y supervivencia de las plantas frente a este tipo específico de contaminantes. Este fenómeno podría estar relacionado con mecanismos de respuesta y tolerancia desarrollados por las plantas para hacer frente a condiciones adversas del suelo.

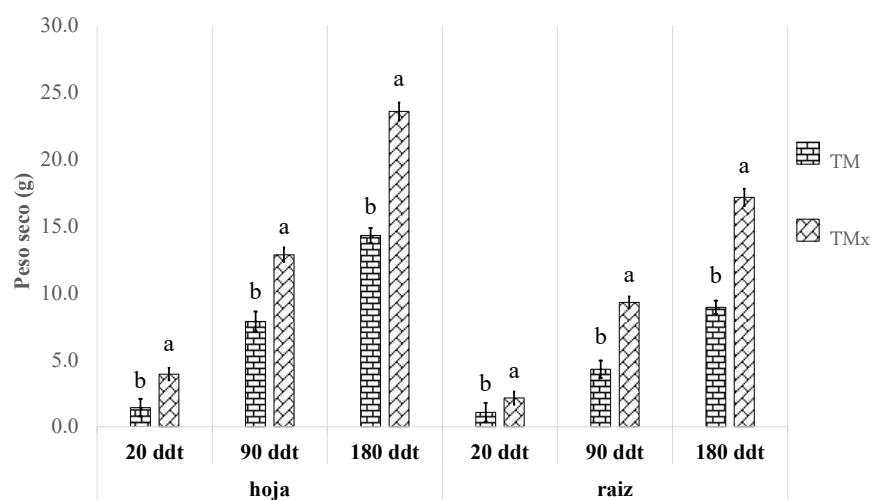


Figura 1. Estimación y comparación de peso seco entre plantas en medio contaminado y no contaminado. TM = planta de mala madre en suelo sin contaminar; TMx = planta de mala madre en suelo contaminado con glifosato.

Figure 1. Estimation and comparison of dry weight between plants in contaminated and non-contaminated medium. TM = Soil not contaminated + plant of *C. comosum*; TMx = soil contaminated with glyphosate + plant of *C. comosum*.

Uno de los mecanismos clave que contribuyen a la degradación del glifosato es la actividad de la enzima glifosato oxidoreductasa (GOX), que es producida por bacterias como *Pseudomonas* y *Bacillus*. Esta enzima convierte el glifosato en AMPA (ácido aminometilfosfónico) y glicolato, reduciendo la toxicidad del herbicida en el suelo. A medida que el glifosato es degradado, los productos resultantes pueden ser menos perjudiciales para las plantas, lo que permite que los recursos energéticos y los asimilados producidos en las hojas se destinen al crecimiento foliar y radicular (Zhan, Feng, Fan y Chen, 2018).

El hecho de que las plantas crecidas en suelos contaminados con glifosato hayan tenido un peso seco superior al del suelo control podría estar relacionado con una tolerancia inducida por los microorganismos que degradan el glifosato. En este sentido, la presencia de microorganismos que producen GOX en la rizosfera puede facilitar la biorremediación del suelo, permitiendo que las plantas no solo sobrevivan, sino que mantengan o incluso incrementen su capacidad de acumulación de biomasa. Este proceso puede ser entendido como una respuesta adaptativa de las plantas, que aprovechan la actividad microbiana para minimizar el impacto tóxico del glifosato, lo que se traduce en un crecimiento vigoroso.

Además, el glicolato (uno de los productos de la degradación del glifosato) puede ser asimilado por las plantas y convertido en otros compuestos útiles para su metabolismo, lo cual podría explicar por qué las plantas en suelos contaminados presentan un mayor crecimiento. De este modo, la biomasa superior observada en estas plantas puede reflejar su capacidad para aprovechar los procesos de detoxificación promovidos por la actividad de la GOX, lo que mejora su resiliencia y optimiza la distribución de asimilados hacia hojas, tallos y raíces, asegurando su desarrollo incluso en condiciones adversas (South, Cavanagh, Liu y Ort, 2019).

El glifosato es un herbicida persistente y ampliamente utilizado, cuyos impactos ambientales y en salud aún están en estudio, siendo la fitorremediación una alternativa ecológica para su remoción (Gao et al., 2023). En la Figura 2, se observa el comportamiento del glifosato y su metabolito AMPA en el suelo testigo y en el suelo contaminado con plantas de mala madre. En donde se aprecia que los primeros días de contaminación, se registra una leve disminución en los niveles del contaminante, atribuible a su degradación natural, influenciada por factores ambientales como la luz solar, temperatura o la acción microbiana en el suelo.

A partir de los noventa días posteriores al inicio del experimento, se evidencia una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos, ya que el tratamiento TMx presenta una gran disminución en la concentración de glifosato en el suelo a diferencia del tratamiento TSx. Sin embargo, con esto se comprueba que la reducción de glifosato en el suelo se puede dar de forma natural, impulsada por los factores antes mencionados, teniendo la mayor reducción entre los 90 y 180 ddt. Con ello se demuestra que ni el suelo (con todos sus componentes) ni los factores ambientales poseen, por ellos mismos, la capacidad natural de degradar completamente el glifosato. No obstante, a los 180 ddt, el tratamiento TMx presenta un 100% de reducción del contaminante.

González-Ortega y Fuentes-Ponce (2022) mencionan que el periodo de vida de glifosato antes de metabolizarse a AMPA es de hasta 215 días en el suelo y presente en una vida acuática hasta 91 días. De acuerdo con esto, se puede decir que la planta de *C. comosum* tiene la capacidad de reducir el tiempo de vida de glifosato en el suelo.

El AMPA, el metabolito más importante resultante de la degradación del glifosato, muestra características similares al glifosato, pero es más persistente, con una vida media que oscila entre 119 y 985 días (Bohórquez-Vivas, 2020²). La presencia y concentración del AMPA depende de la degradación del glifosato: a mayor degradación de glifosato corresponde una mayor presencia de AMPA.

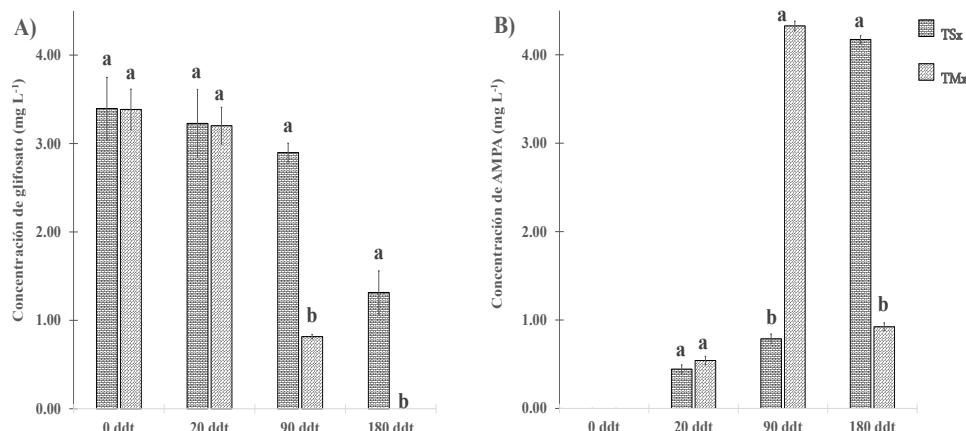


Figura 2. Cuantificación de glifosato (A) y AMPA (B) en el suelo a los 0, 20, 90 y 180 ddt. TSx = suelo contaminado con glifosato; TMx = suelo contaminado con glifosato + planta de mala madre.

Figure 2. Quantification of glyphosate (A) and AMPA (B) in soil at 0, 20, 90, and 180 ddt. TSx = soil contaminated with glyphosate, TMx = soil contaminated with glyphosate + plant of *C. comosum*.

² Bohórquez-Vivas, D. J. (2020). *Métodos Analíticos para la Determinación de Glifosato en Matrices Ambientales*. Tesis para obtener grado de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77955>

Como se esperaba, de acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 2), al inicio del experimento no se encontró el metabolito AMPA en el suelo, sino hasta los 20 ddt, una vez que se inició la biotransformación del glifosato. A los 90 ddt, la concentración de AMPA en el suelo aumentó, siendo mayor en el tratamiento TMx debido a una mayor degradación del glifosato, lo que concuerda con lo antes mencionado.

Sin embargo, entre los 90 y 180 ddt, el tratamiento TSx incrementa su nivel de AMPA a diferencia del TMx. Esto demuestra que la planta de mala madre tiene la capacidad de reducir las concentraciones tanto de glifosato como de AMPA.

Para evaluar la capacidad de *C. comosum* para extraer el glifosato y AMPA del suelo, se analizaron las diferentes partes (raíz y hojas) de la planta, en las cuales no se detectó la presencia del plaguicida. Sin embargo, se observó la presencia de concentraciones de AMPA en las raíces a los 90 y 180 ddt, con concentraciones promedio de 0.789 y 0.913 mg L⁻¹, respectivamente.

El glifosato puede ser absorbido por las raíces y transportado a otras partes de la planta, lo que puede provocar daños en su salud. Tong *et al.* (2017), informaron que concentraciones de glifosato en el suelo por encima de 200 mg L⁻¹ provocan la aparición de manchas marrón y la caída prematura de las hojas en *Camellia sinensis* L. Resultados similares se observaron en *C. comosum*, que también presentaron manchas de color marrón y caída temprana de las hojas. Sin embargo, en los resultados obtenidos, las plantas de mala madre presentaron decoloración de tejidos a las concentraciones previamente mencionadas (0.789 y 0.913 mg L⁻¹) correspondientes a niveles más bajos a los reportados por Tong *et al.* (2017).

CONCLUSIONES

Las plantas de *Chlorophytum comosum* (mala madre) han demostrado una notable capacidad de adaptación y tolerancia a suelos contaminados con glifosato y su principal metabolito, AMPA. Esta capacidad les permite no solo sobrevivir, sino incluso aprovechar los compuestos de carbono (C) y nitrógeno (N) liberados durante la degradación del glifosato, lo que se traduce en un mayor crecimiento y desarrollo de la planta.

Los hallazgos de este estudio indican que las plantas de *C. comosum* expuestas a suelos contaminados con glifosato y AMPA exhiben una mayor producción de biomasa, un mayor número de hojas y una altura superior en comparación con las plantas cultivadas en suelos no contaminados. Esta respuesta sugiere que las plantas pueden utilizar los compuestos derivados del glifosato como fuente de nutrientes, lo que les confiere una ventaja adaptativa en ambientes contaminados, por lo que podría ser utilizada con fines de remediación de suelos agrícolas contaminados con glifosato.

Además, se ha observado una relación directa entre la concentración de AMPA presente en el suelo y la concentración inicial de glifosato. A medida que el glifosato se degrada, se produce un aumento en los niveles de AMPA, su principal producto de degradación. Esta relación respalda la hipótesis de que las plantas de *C. comosum* son capaces de aprovechar los subproductos de la degradación del glifosato para su propio beneficio.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos analizados durante el estudio y presentados en este documento están disponibles a solicitud razonable dirigida al autor de correspondencia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Tecnológico Nacional de México / ITS de Los Reyes, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología - IPN, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Michoacán.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: P.S.E., A.B.P.G. y D.A.B. Metodología: P.S.E. Validación: D.A.B. Análisis formal: D.A.B. y A.B.P.G. Investigación: P.S.E. Recursos: D.A.B. y A.B.P.G. Curación de datos: P.S.E. Escritura, preparación del borrador original: P.S.E. Escritura, revisión y edición: A.B.P.G., D.A.B., F.R.M. y M.O.F.H. Supervisión: A.B.P.G., D.A.B., F.R.M. y M.O.F.H.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Tecnológico Nacional de México / ITS de Los Reyes, UPIBI-IPN y CIIDIR-Michoacán por las facilidades otorgadas para el uso de sus equipos e instalaciones durante el desarrollo de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Barrientos-Llanos, H., Castillo-Gutiérrez, C. R., & García-Cárdenas, M. (2015). Functional analysis of growth, biomass accumulation and translocation of dry matter eight vegetables grown in greenhouses. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 2, 76.
- Berdjour, A., Yakamba-Dugje, I., Abdul-Rahman, N., Asomaning-Odoom, D., Yaya-Kamara, A., & Ajala, S. (2020). Direct estimation of maize leaf area index as influenced by organic and inorganic fertilizer rates in guinea savanna. *Journal of Agricultural Science*, 12(6), 66-75. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n6p66>
- Brachhold, K. (2019). Surviving Phosphate Limitation via the C-P Lyase Pathway. Consultado el 14 de febrero, 2024, desde <https://www.advancedsciencenews.com/surviving-phosphate-limitation-via-the-c-p-lyase-pathway/>
- Díaz, O., & Betancour-Aguilar, C. R. (2018). Los pesticidas; clasificación, necesidad de un manejo integrado y alternativas para reducir su consumo indebido una revisión. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(2), 14-30.
- Gao, W., Zhang, Y., Lin, M., Mao, J., Xing, B., Li, Y., & Hou, R. (2023). Capability of phytoremediation of glyphosate in environment by *Vulpia myuros*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 265, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115511>
- González-Ortega, E., & Fuentes-Ponce, M. H. (2022). Dynamics of glyphosate in soil and its effects on microbiota. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 127-144. <https://doi.org/10.20937/RICA.54197>
- Hernández-Ruiz, G. M., Álvarez-Orozco, N. A., & Ríos-Osorio, L. A. (2017). Biorremediaciación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: Revisión sistemática. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18, 139-159. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:564
- Lee, H., Jun, Z., & Zahra, Z. (2021). Phytoremediation: the sustainable strategy for improving indoor and outdoor air quality. *Environments*, 8(118), 1-16. <https://doi.org/10.3390/environments8110118>
- Primost, J. E., Marino, D. J. G., Aparicio, V. C., Costa, J. L., & Carriquiriborde, P. (2017). Glyphosate and AMPA, "pseudo-persistent" pollutants under real-world agricultural management practices in the Mesopotamic Pampas agroecosystem, Argentina. *Environmental Pollution*, 229, 771-779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.006>
- Salazar-López, N. J., Silveira-Gramont, M. I., Zuno-Floriano, F. G., Rodríguez-Olibarría, G., Hengel, M., & Aldana-Madrid, M. L. (2016). Dissipation of glyphosate from grapevine soils in Sonora, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 385-391.
- SAS Institute (2002). *Statistical Analysis System. User's Guide. Release 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación.
- South, P. F., Cavanagh, A. P., Liu, H. W., & Ort, D. R. (2019). Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science*, 363(45), eaat9077. <https://doi.org/10.1126/science.aat9077>
- Tong, M., Gao, W., Jiao, W., Zhou, J., Li, Y., He, L., & Hou, R. (2017). The Uptake, Translocation, Metabolism, and Distribution of Glyphosate in Nontarget Tea Plant (*Camellia sinensis* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1-35. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02474>
- Zhan, H., Feng, Y., Fan, X., & Chen, S. (2018). Recent advances in glyphosate biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 5033-5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>