



Toxicidad del glifosato sobre arveja (*Pisum sativum*) en suelo franco-arenoso con un consorcio bacteriano*

Toxicity of glyphosate in snow pea (*Pisum sativum*) on sandy-loam soil with a bacterial consortium

Kevin Cruz-Inca¹, Lourdes Suna-Alagón¹, José Iannacone^{1,2}

* Recepción: 4 de diciembre, 2024. Aceptación: 26 de febrero, 2025. Este trabajo fue financiado por el concurso de fondos para proyectos de tesis (Resolución Directoral Académica de carrera N°097-2022-DACIA-DAFCA-U. CIENTIFICA), Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

¹ Universidad Científica del Sur, Facultad de Ciencias ambientales, Lima, Perú. kevin.cruz.inca@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6482-1663>); lourdessuna@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5298-1141>).

² Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal, Grupo de Investigación de Sostenibilidad Ambiental – GISA, Lima, Perú. joseiannacone@gmail.com (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0003-3699-4732>).

Resumen

Introducción. El glifosato (GLI) es un herbicida común que, cuando es aplicado en exceso, puede afectar tanto a las malezas de hoja ancha. Las bacterias promotoras del crecimiento de plantas pueden favorecer la resistencia y protección de los cultivos agrícolas por efecto del GLI. **Objetivo.** Evaluar la toxicidad del GLI en la raíz, tallo y raíz + tallo de *Pisum sativum* (arveja) en suelo franco-arenoso, con la presencia de las bacterias *Ochrobactrum anthropi* y *Pseudomonas aeruginosa* de forma individual y en un consorcio bacteriano conformado por ambos microorganismos. **Materiales y métodos.** El experimento se llevó a cabo en un invernadero de Lima, Perú. Se realizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con 32 tratamientos, cuyo suelo se mezcló con GLI y fue sometido a análisis edafológicos. Cuatro tratamientos fueron controles, 12 contenían suelo con *O. anthropi* y *P. aeruginosa* de forma individual y en un consorcio bacteriano, y 16 tratamientos contenían además *P. sativum*. **Resultados.** *P. sativum* expuesto a 8,71 mL L⁻¹ y 17,42 mL L⁻¹ de GLI mostró una reducción significativa en el crecimiento, particularmente en la biomasa fresca del tallo y la raíz, pero la aplicación de un consorcio bacteriano revirtió este efecto, lo que mejora el crecimiento. El GLI alteró el pH y la conductividad eléctrica del suelo, aunque la materia orgánica no cambió. El potasio disponible en el suelo aumentó con GLI, pero las bacterias redujeron este efecto, y el fósforo disponible incrementó en presencia de *P. sativum* y GLI a 17,42 mL L⁻¹. **Conclusiones.** El GLI a las concentraciones más altas afectó el crecimiento del tallo y de la raíz del *P. sativum*, pero la inoculación bacteriana atenuó este efecto y modificó las propiedades del suelo. Esto subraya la relevancia de la interacción entre herbicida, microorganismos, y parámetros edafológicos en la agricultura.

Palabras clave: biología del suelo, herbicida, microorganismo, *Ochrobactrum anthropi*, *Pseudomonas aeruginosa*.



Abstract

Introduction. Glyphosate (GLI) is a common herbicide that, when applied in excess, can affect both broadleaf weeds and cereals. Plant growth promoting bacteria can promote GLI resistance and protection of agricultural crops.

Objective. To evaluate the toxicity of GLI on the root, stem and root + stem of *Pisum sativum* (snow pea) in sandy loam soil, with the presence of the bacteria *Ochrobactrum anthropi* and *Pseudomonas aeruginosa* individually and in a bacterial consortium made up of both microorganisms. **Materials and methods.** The experiment was carried out in a greenhouse in Lima, Peru. A completely randomized design (CRD) was performed with 32 treatments, whose soil was mixed with GLI and subjected to edaphological analysis. Four treatments were controls, 12 contained soil with *O. anthropi* and *P. aeruginosa* individually and in a bacterial consortium, and 16 treatments also contained *P. sativum*. **Results.** *P. sativum* exposed to 8.71 mL L⁻¹ and 17.42 mL L⁻¹ of GLI showed a significant reduction in growth, particularly in fresh shoot and root biomass, but the application of a bacterial consortium reversed this effect, improving growth. GLI altered soil pH and electrical conductivity, although organic matter did not change. Soil available potassium increased with GLI, but bacteria reduced this effect, and available phosphorus increased in the presence of *P. sativum* and GLI at 17.42 mL L⁻¹. **Conclusions.** GLI at the highest concentrations affected shoot and root growth of *P. sativum*, but bacterial inoculation attenuated this effect and modified soil properties. This underlines the relevance of the interaction between herbicide, microorganisms, and soil parameters in agriculture.

Keywords: herbicide, microorganism, *Ochrobactrum anthropi*, *Pseudomonas aeruginosa*, soil biology.

Introducción

El suelo es un recurso esencial para los ecosistemas y la producción de alimentos, vital para la sociedad mundial (Burbano, 2016). El suelo franco-arenoso ha sido objeto de estudio debido a sus características distintivas (Xu et al., 2024). En Perú, este tipo de suelo se encuentra principalmente en campos costeros, caracterizándose por un pH alcalino, niveles moderados de fósforo, alta disponibilidad de potasio, baja presencia de materia orgánica y alta conductividad eléctrica (Alache Lizarbe et al., 2020).

Para garantizar la productividad agrícola, se recurre frecuentemente a la aplicación de plaguicidas, entre ellos los organofosforados (Badii & Varela, 2015). El glifosato (GLI) es un herbicida post-emergente de amplio espectro (Arispe Vázquez et al., 2023). Este plaguicida sistémico perteneciente al grupo de los organofosforados es utilizado para el control de malezas de hoja ancha, anuales y perennes (Ledoux et al., 2020). Se emplea como ingrediente activo en diversas formulaciones comerciales, las cuales varían en su forma química, concentración de ingrediente activo y proporción de ingredientes inertes (Ledoux et al., 2020).

El GLI es uno de los herbicidas más utilizados a nivel mundial y, en Perú, se comercializa bajo más de 30 marcas diferentes (Pedemonte, 2017). Su capacidad de adherencia al suelo depende de sus propiedades fisicoquímicas (Ledoux et al., 2020). En suelos con textura franco-arenosa, la movilidad del GLI es limitada, lo que reduce su probabilidad de alcanzar las aguas subterráneas, especialmente más allá de los 15 cm de profundidad (Villareal, 2018). La aplicación de GLI está relacionada a cambios en la actividad, cantidad y composición de la comunidad microbiana del suelo (Romano Armada et al., 2019), lo que afecta la calidad química y física del suelo (Pronk et al., 2017).

El GLI presenta una vida media relativamente corta, asociada a su capacidad de biodegradación por microorganismos, y es dependiente de la concentración de nutrientes, tipo de suelo, concentraciones de pH, materia orgánica (González Ortega & Fuentes Ponce, 2022), conductividad eléctrica, fósforo y potasio (Tofiño Rivera et al.,

2020). Los microorganismos del suelo como las bacterias tienen la capacidad de metabolizar el GLI, y son fuente de carbono, nitrógeno y fósforo (González Ortega & Fuentes Ponce, 2022).

Dentro de los microorganismos, se han aislado bacterias promotoras del crecimiento de plantas con resistencia al GLI, como *Ochrobactrum anthropi* (Singh et al., 2020) y *Pseudomonas aeruginosa* (Ezaka et al., 2018). Otros estudios han demostrado que *O. anthropi* puede metabolizar GLI en 120 a 400 horas (Rossi et al., 2021). Se ha documentado la capacidad de degradación de GLI por veintiocho especies bacterianas, lo cual incluye el consorcio formado por: *O. anthropi* y *P. aeruginosa*, con capacidad de degradación intermedia (Castrejón Godínez et al., 2021).

Pisum sativum (arveja) es una de las fabáceas más sensibles a contaminantes químicos y es frecuentemente utilizada como planta bioindicadora (Singh et al., 2019). Esta especie es ideal para evaluar los efectos adversos del GLI (Singh et al., 2020). Además, representa cambios en su crecimiento, y de igual forma su bajo costo es adecuada para la investigación (Cantaro Segura, 2019). El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la toxicidad del GLI en la raíz, tallo, y raíz + tallo de *P. sativum* (arveja) en suelo franco-arenoso, con la presencia de las bacterias *O. anthropi* y *P. aeruginosa* de forma individual y en un consorcio bacteriano conformado por ambos microorganismos.

Materiales y métodos

Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de la Universidad Científica del Sur, Villa El Salvador, Lima, Perú (Latitud: -12.220000, Longitud: -76.978056) a 5 m s. n. m. En el invernadero se presentó una temperatura promedio de 20 °C y una humedad relativa del 70 %. El experimento se realizó entre octubre de 2022 y junio de 2023.

Muestras de suelos franco - arenosos

Las muestras se recolectaron en el centro poblado Quebrada Verde, Pachacámac, Lima, Perú (12° 35' 14" S; 75° 47' 39" O). Se extrajeron 3 kg de suelo de 48 puntos a 30 cm de profundidad, para un total de 144 kg (Ministerio del Ambiente, 2014). Tras el almacenamiento y etiquetado, el suelo se transportó al invernadero para el experimento con herbicida GLI (concentrado soluble en agua, producto comercial Roundup® a 360/L, Bayer®). Se colocaron 1,5 kg de suelo franco-arenoso en macetas de 2 L con drenaje. Se evaluaron 96 macetas: 32 tratamientos, cada una con tres repeticiones.

Consortio bacteriano e incorporación del GLI al suelo

La bacteria *O. anthropi* (ATCC BAA-749) fue adquirida como cepa referenciada de la organización American Type Culture Collection, ubicada en Virginia, EE. UU. *P. aeruginosa* (ATCC 17853) fue obtenida del Laboratorio de Investigación de Microbiología Molecular y Genómica Bacteriana de la Universidad Científica del Sur, Lima, Perú. Se agregó GLI a las macetas de suelo según lo indicado en el Cuadro 1, a 480 g L⁻¹. Se diluyó 2 L de GLI en 100 L de agua destilada. Las macetas permanecieron con GLI por tres meses para asegurar su adherencia a los coloides del suelo (Suwardji & Sudanth, 2021).

Diseño experimental

Se llevó a cabo un diseño completamente aleatorizado (DCA) que incluyó 32 tratamientos distribuidos en un total de 96 macetas. Consistió en 12 macetas a base de un control sin GLI 0 % (0 mL L⁻¹) y tres niveles de concentración de GLI: 2 % (4,36 mL L⁻¹), 4 % (8,71 mL L⁻¹) y 8 % (17,42 mL L⁻¹) cada uno con tres repeticiones (T1

Cuadro 1. Tratamientos sin y con glifosato a diferentes concentraciones en presencia microbiana sobre la materia orgánica en suelo y suelo + *Pisum sativum*. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero de Lima, Perú.

Table 1. Treatments without and with glyphosate at different concentrations in microbial presence on organic matter in soil and soil + *Pisum sativum*. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse of Lima, Peru.

Tratamientos	Sin Glifosato		Con Glifosato	
	Control	4,36 mL L ⁻¹	8,71 mL L ⁻¹	17,42 mL L ⁻¹
Suelo	T1	T2	T3	T4
Suelo + <i>P. aeruginosa</i>	T5	T6	T7	T8
Suelo + <i>O. anthropi</i>	T9	T10	T11	T12
Suelo + <i>P. aeruginosa</i> + <i>O. anthropi</i>	T13	T14	T15	T16
Suelo + <i>P. sativum</i>	T17	T18	T19	T20
Suelo + <i>P. sativum</i> + <i>P. aeruginosa</i>	T21	T22	T23	T24
Suelo + <i>P. sativum</i> + <i>O. anthropi</i>	T25	T26	T27	T28
Suelo + <i>P. sativum</i> + <i>P. aeruginosa</i> + <i>O. anthropi</i>	T29	T30	T31	T32

T1-T16: equivale a los tratamientos sin *Pisum sativum* aplicado en mL L⁻¹ y T17-T32: equivale al suelo con los diferentes tratamientos con *Pisum sativum* y los grupos bacterianos. / T1-T16: referred to with *Pisum sativum* treatments applied in mL L⁻¹ and T17-T32: referred to treated or with *Pisum sativum* and bacterial groups.

a T4). Los primeros tratamientos (T5 a T16) incluyeron suelo inoculado con grupos bacterianos de *P. aeruginosa*, *O. anthropi*, y el consorcio bacteriano, para un total de 36 macetas. Los siguientes tratamientos (T17 a T32) consistieron en suelo con los mismos grupos bacterianos más *P. sativum*, con un total de 48 macetas (Cuadro 1).

Preparación del inóculo bacteriano

Las cepas *O. anthropi* y *P. aeruginosa* fueron incubadas a 35 °C durante 24 h en placas Petri con agar nutritivo y se transfirieron a matraces Erlenmeyer de 500 mL con caldo nutritivo para promover un mayor crecimiento poblacional a 36 °C, con agitación continua durante 24 h. Se inocularon las bacterias en matraces aforados de 6 L que contenían 4800 mL de suero fisiológico al 0,5 %. La concentración bacteriana en los matraces se ajustó a la escala de 0,5 de McFarland ($1,5 \times 10^8$ UFC/mL), para obtener 4800 mL de solución bacteriana (Heck et al., 2015).

Inoculación de bacterias a macetas de suelo

Se extrajeron 200 mL de los matraces aforados con la solución bacteriana para el riego superficial de cada maceta en una única ocasión, incluidos los controles. Una semana después de la inoculación bacteriana, se sembraron tres semillas de *P. sativum* por maceta. Durante el periodo de crecimiento de las plantas, todas las macetas se regaron con 200 mL de agua de grifo potable decolorada en forma interdiaria.

Efecto del glifosato

Los parámetros biométricos evaluados en *P. sativum* incluyeron: longitud del tallo, longitud de la raíz y biomasa. La longitud del tallo se midió de forma interdiaria entre 14 y 21 días después de la emergencia del 50 % de las plántulas del grupo control. La longitud de la raíz se midió una sola vez, en el día 21, tras extraer las plantas de las macetas. La biomasa húmeda se evaluó midiendo el peso total de la planta en estado fresco, y tomando en cuenta el peso fresco del tallo y la raíz. La biomasa seca se obtuvo del peso seco del tallo y la raíz de la planta.

Parámetros edafológicos, después del proceso de la aplicación del glifosato

Los parámetros edafológicos evaluados incluyeron: materia orgánica, determinada mediante el método fue el de oxidación húmeda con una solución titulante compuesta por sulfato ferroso propuesto por Walkley – Black y multiplicada por el factor 1,724 (Bautista & Arévalo, 2021). La conductividad eléctrica (CE), fue obtenida del extracto de la pasta saturada (Millán & Larrieu, 2018). El pH, fue medido mediante la lectura del extracto de relación suelo-agua 1:1 (Gutiérrez & Cáceres, 2018). El potasio disponible (K^+), fue determinado mediante el extracto de acetato de amonio 1N (Grewal et al., 2017); y fósforo (P), fue medido por el método de Olsen modificado (Carrero et al., 2015).

no en refe-
rencias

Análisis estadístico

Se implementó un diseño completamente aleatorizado (DCA) para los 32 tratamientos, que incluyó mediciones de longitud de raíz y tallo, biomasa de raíz y tallo, así como la secuencia NOEC - LOEC y parámetros edafológicos del suelo. Los datos se analizaron con la prueba de Shapiro-Wilk y se observó que no se cumplió con la normalidad de los datos. Por lo tanto, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, complementada con la prueba de Games-Howell para la comparación de medias ($p < 0,05$) del promedio de las tres réplicas. Se utilizó el software IBM SPSS Statistics 24.

Resultados

Materia orgánica

En las macetas con suelo, microorganismos y GLI a concentraciones a las cuatro concentraciones no se observaron diferencias significativas (Cuadro 2). En las macetas con suelo, microorganismos y *P. sativum*, se destacó el tratamiento de suelo + *P. sativum* + sin bacterias) como el único que mostró una diferencia significativa (Cuadro 2). Esto ocurrió con una concentración de GLI al 8 % ($17,42 \text{ mL L}^{-1}$), en contraste con el control de GLI al 0 % (0 mL L^{-1}) (Cuadro 2).

Conductividad eléctrica (CE)

En las macetas con suelo y microorganismos, el GLI a distintas concentraciones afectó la CE (Cuadro 2). En el suelo + *P. aeruginosa*, y en el suelo + *O. anthropi*, las concentraciones de GLI al 2 %, 4 %, y 8 %, mostraron diferencias significativas en comparación con el control (GLI al 0 %) (Cuadro 2). No se detectaron diferencias significativas en la CE en los tratamientos sin bacterias y en consorcio bacteriano (Cuadro 2). En las macetas con suelo, microorganismos y *P. sativum*, el tratamiento suelo + *P. sativum* L. + sin bacterias fue el único con una diferencia significativa en presencia de GLI al 2 % (Cuadro 2).

La distribución del pH en las macetas con suelo, microorganismos y GLI mostró variaciones en los tratamientos (Cuadro 2). En los tratamientos suelo sin bacterias, suelo + *P. aeruginosa*, suelo + *O. anthropi* y suelo + consorcio bacteriano, el pH disminuyó conforme aumentaba la concentración de GLI en comparación con el control (Cuadro 2). En las macetas con suelo, microorganismos, *P. sativum* y GLI, se observaron diferencias significativas en los tratamientos respectivos (Cuadro 2).

En suelo sin bacterias + *P. sativum*, suelo + *P. aeruginosa* + *P. sativum* y suelo + *O. anthropi* + *P. sativum*, se evidenciaron diferencias entre las tres concentraciones de GLI en comparación con el control (Cuadro 2). En el tratamiento suelo + consorcio bacteriano + *P. sativum*, se identificaron diferencias significativas en el pH de los suelos contaminados con GLI y el control. El pH fue menor en los suelos con GLI (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto del glifosato (GLI) a diferentes concentraciones en presencia microbiana sobre parámetros edafológicos en suelo y suelo + *Pisum sativum*. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero de Lima, Perú.

Table 2. Effect of glyphosate (GLI) at different concentrations in the presence of bacteria on edaphological parameter in soil and, soil + *Pisum sativum*. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse of Lima, Peru.

GLI	T	MO		CE		pH		P		K	
		X	p	X	p	X	p	X	p	X	p
0 %	T1	3,21	a	10,48	a	7,56	a	52,26	a	1241,60	a
	T5	3,41	a	14,61	a	7,52	a	57,52	a	1322,33	a
	T9	3,38	a	13,18	a	7,55	a	62,69	a	1776,87	a
	T13	3,15	a	9,57	a	7,56	a	58,69	a	1429,00	a
	T17	2,99	a	10,58	a	7,58	a	45,73	a	1069,73	a
	T21	3,35	a	10,53	a	7,54	a	50,04	a	1023,53	a
	T25	3,13	a	8,84	a	7,66	a	49,88	a	1657,60	a
	T29	2,60	a	11,30	a	7,63	a	45,91	a	1488,93	a
2 %	T2	3,81	a	6,86	ab	7,28	b	91,33	b	2762,20	a
	T6	4,21	a	6,35	ab	7,07	ab	54,07	ab	3180,67	a
	T10	4,02	a	7,69	ab	7,26	ab	30,40	a	3220,00	a
	T14	4,24	a	7,43	ab	7,23	ab	27,47	a	3173,33	a
	T18	3,19	a	5,19	a	7,00	a	19,65	a	2640,00	a
	T22	3,45	a	7,38	ab	7,00	a	23,16	a	2290,00	a
	T26	4,46	a	9,29	b	7,05	ab	27,78	a	3100,00	a
	T30	3,90	a	8,34	ab	7,01	ab	23,93	a	3210,00	a
4 %	T3	4,18	a	7,00	a	7,23	d	29,75	a	3590,67	b
	T7	4,92	a	8,21	a	7,19	d	28,30	a	3442,00	ab
	T11	3,93	a	8,04	a	7,23	d	51,89	ab	2860,67	ab
	T15	3,53	a	6,67	a	7,13	cd	80,61	bc	2093,80	ab
	T19	3,62	a	8,55	a	6,78	bc	116,70	c	2862,13	ab
	T23	3,64	a	7,03	a	6,74	ab	111,50	c	2585,33	ab
	T27	3,93	a	8,32	a	6,56	ab	105,70	c	2182,00	ab
	T31	4,07	a	8,55	a	6,38	a	100,29	c	1914,87	a
8 %	T4	4,53	a	6,43	a	7,10	b	84,19	a	3098,67	a
	T8	3,68	a	7,71	ab	7,03	b	78,64	a	2505,60	a
	T12	4,63	a	7,50	ab	6,81	bc	80,21	a	2108,33	a
	T16	4,18	a	6,60	a	7,05	b	83,60	a	2017,67	a
	T20	4,43	a	8,92	b	6,46	ab	117,81	b	2691,33	a
	T24	4,17	a	9,46	b	6,84	bc	130,89	b	2216,67	a
	T28	3,81	a	9,38	b	6,54	ab	118,61	b	1990,13	a
	T32	4,24	a	9,46	b	6,34	a	111,43	b	1994,0000	a

T1 a T32 corresponden a los tratamientos indicados en el Cuadro 1. X = promedio. Las diferentes letras indican diferencias significativas en $p < 0,05$. / T1 to T32 correspond to the treatments indicated in Table 1. X = average. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

Fósforo (P)

En las macetas de suelo, los tratamientos de suelo sin bacterias, con GLI al 0 % mostraron un valor diferente al GLI al 2 % y 8 % (Cuadro 2). En el suelo + consorcio bacteriano, el P no mostró diferencias entre las concentraciones de GLI al 4 % y 8 % respecto al control (Cuadro 2). En los tratamientos suelo + *P. aeruginosa* y suelo + *O. anthropi*, no se evidenciaron diferencias en los niveles de P (Cuadro 2). En las macetas con suelo, microorganismos y *P. sativum*, el GLI al 0 % y 2 % mostró niveles bajos de P, con diferencias con el GLI al 4 % y 8 % (Cuadro 2).

Potasio (K)

En las macetas con suelo, los tratamientos a diferentes concentraciones de GLI no evidenciaron un efecto significativo sobre el K (Cuadro 2). En suelo + *P. aeruginosa*, GLI al 0 % mostró una diferencia significativa frente a GLI al 2 % y 4 % (Cuadro 2). En suelo + consorcio bacteriano, GLI al 0 % exhibió una diferencia significativa únicamente con la concentración de GLI al 2 % (Cuadro 2).

Efectos del glifosato sobre *P. sativum* en diferentes grupos bacterianos

En las macetas con suelo, microorganismos y *P. sativum*, se observó que la longitud media de raíz fue mayor en ausencia de GLI (0 %) (Cuadro 3). Las concentraciones de GLI al 4 % y 8 % redujeron significativamente la longitud de raíz, mientras que al 2 %, se observó una diferencia significativa en todos los tratamientos, excepto en suelo + consorcio bacteriano (Cuadro 3). Para la longitud media del tallo en el día 14, suelo sin bacterias mostró diferencias significativas entre GLI al 0 %, 2 % y 8 % (Cuadro 3).

En GLI al 8 %, la longitud del tallo a 14 días mostró diferencias frente a las demás concentraciones (Cuadro 3). Los tratamientos a 14 días, mostraron diferencias entre GLI al 0 % y GLI al 4 % y 8 % (Cuadro 3). Para GLI al 2 %, la longitud media de tallo mostró diferencias con GLI al 8 % (Cuadro 3). Para suelo + consorcio bacteriano, GLI al 0 %, 2 % y 4 %, mostró valores de longitud media de tallo que evidenciaron una diferencia con GLI al 8 % (Cuadro 3). En el día 21, GLI al 0 %, 2 % y 4 % para la longitud del tallo mostraron valores más altos en comparación con GLI al 8 % (Cuadro 3).

Efecto de GLI en la biomasa de *P. sativum* en diferentes grupos bacterianos

En ausencia de microorganismos, se detectaron diferencias significativas en el peso fresco del tallo y la raíz en respuesta a diferentes concentraciones de GLI (Cuadro 4). Para el tallo, el control sin GLI (0 mL L⁻¹) que mostró para una disminución del peso fresco con el aumento con la concentración (Cuadro 4). En cuanto a la raíz, se encontraron pesos frescos diferentes en concentraciones de GLI al 2 % y 8 % en comparación con el control sin GLI (Cuadro 4).

La biomasa fresca total (raíz + tallo) mostró una diferencia con GLI al 4 %. En el grupo con *P. aeruginosa*, la biomasa fresca de la raíz y la biomasa fresca total disminuyeron bajo las concentraciones de GLI al 2 %, 4 % y 8 % (Cuadro 4). En el grupo con *O. anthropi*, la biomasa fresca del tallo y del total se redujeron con GLI de 8 % (Cuadro 4). No se observaron en la biomasa fresca de la raíz bajo concentraciones de GLI (Cuadro 4). En el grupo con el consorcio bacteriano, se observó una reducción del 61,07 % en la biomasa fresca del tallo con GLI al 8 % en comparación con el control (Cuadro 4).

Cuadro 3. Efecto del glifosato a diferentes concentraciones en presencia microbiana sobre la longitud de la raíz, y longitud de tallo de *P. sativum* a diferentes días de tratamiento. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero de Lima, Perú.

Table 3. Effect of glyphosate at different concentrations in microbial presence on root length, and, stem length of *P. sativum* at different days of treatment. Between October 2022 and June 2023, in a greenhouse of Lima, Peru.

Microorganismo	GLI	LR21		LR14		LT14		LT18		LT21	
	%	X	p	X	p	X	p	X	p	X	p
sin bacterias	0 %	8,67	c	15,38	c	18,75	c	25,25	c	34,88	d
	2 %	4,75	b	16,83	c	19,00	c	25,42	c	26,58	c
	4 %	2,92	a	7,58	b	8,00	b	11,17	b	13,50	b
	8 %	1,53	a	1,17	a	1,25	a	1,58	a	1,58	a
<i>P. aeruginosa</i>	0 %	7,83	d	12,25	b	14,63	b	21,00	b	26,50	b
	2 %	5,17	c	13,17	b	15,00	b	20,50	b	24,33	b
	4 %	2,45	b	10,50	b	11,83	b	15,67	b	18,83	b
	8 %	0,98	a	2,67	a	2,67	a	2,83	a	3,42	a
<i>O. anthropi</i>	0 %	7,17	c	13,63	c	15,25	c	25,50	c	30,75	d
	2 %	4,87	b	10,67	bc	12,33	bc	17,83	b	21,50	c
	4 %	1,90	a	8,00	b	8,75	b	10,83	b	13,50	b
	8 %	1,08	a	2,25	a	2,37	a	2,70	a	2,87	a
Consortio bacteriano	0 %	7,17	c	16,50	b	18,13	b	24,75	b	28,25	b
	2 %	6,17	c	16,08	b	17,67	b	23,83	b	27,50	b
	4 %	3,57	b	14,42	b	15,67	b	21,00	b	23,50	b
	8 %	1,85	a	4,67	a	4,83	a	6,17	a	6,83	a

GLI: Glifosato. GLI: 0 % (0 mL L⁻¹), 2 % (4,36 mL L⁻¹), 4 % (8,71 mL L⁻¹) y 8 % (17,42 mL L⁻¹). X: promedio. LR21: Longitud raíz día 21 (cm); LR14: Longitud raíz día 14 (cm); LT14: Longitud tallo día 14 (cm); LT18: Longitud tallo día 18 (cm); LT21: Longitud tallo día 21 (cm); X: promedio. Las diferentes letras indican diferencias significativas en $p < 0,05$. / GLI: Glyphosate. GLI: 0 % (0 mL L⁻¹), 2 % (4,36 mL L⁻¹), 4 % (8,71 mL L⁻¹) and 8 % (17,42 mL L⁻¹). X: average. LR21: Root length day 21 (cm); LR14: Root length day 14 (cm); LT14: Stem length day 14 (cm); LT18: Stem length day 18 (cm); LT21: Stem length day 21 (cm). X: average. The different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

Efecto de diferentes grupos bacterianos en el desarrollo de *P. sativum* bajo diferentes concentraciones de glifosato

A GLI al 0 %, se observó una disminución del 17,3 % en la longitud media de la raíz en los grupos con *O. anthropi* y el consorcio bacteriano, en comparación con el grupo sin bacterias (Cuadro 2). En la concentración de GLI al 2 %, no se observaron diferencias significativas en la longitud media de la raíz entre los distintos grupos bacterianos (Cuadro 2). A GLI al 4 %, el grupo con consorcio bacteriano mostró una diferencia significativa en comparación con el grupo *O. anthropi* (Cuadro 2). A GLI al 8 %, el consorcio bacteriano presentó diferencias significativas respecto a *P. aeruginosa* (Cuadro 2).

NOEC y LOEC del glifosato sobre *P. sativum* en presencia de microorganismos

Los valores de NOEC y LOEC para cada grupo bacteriano se reportan en el Cuadro 5. El grupo sin bacterias exhibió un NOEC más alto para el peso seco del tallo y el total, mientras que el LOEC más bajo fue para la longitud

Cuadro 4. Efecto del glifosato a diferentes concentraciones en presencia microbiana sobre la biomasa de tallo fresco, raíz fresca, tallo + raíz fresca, tallo seco, raíz seca y tallo + raíz seca de *P. sativum* a diferentes días de tratamiento. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero de Lima, Perú.

Cuadro 4. Effect of glyphosate at different concentrations in microbial presence on fresh stem biomass, fresh root, stem + fresh root, dry stem, dry root and stem + dry root of *P. sativum* at different days of treatment. Between October 2022 and June 2023, in a greenhouse of Lima, Peru.

Microorganismo	GLI	TF		RF		TRF		TS		RS		TRS	
	%	X	p	X	p	X	p	X	p	X	p	X	p
sin bacterias	0 %	0,870	c	0,446	b	1,316	b	0,063	a	0,045	a	0,108	a
	2 %	0,792	bc	0,107	a	0,899	ab	0,072	a	0,018	a	0,090	a
	4 %	0,463	ab	0,305	ab	0,768	a	0,060	a	0,038	a	0,097	a
	8 %	0,162	a	0,757	c	0,919	ab	0,064	a	0,154	b	0,218	b
<i>P. aeruginosa</i>	0 %	0,892	b	0,551	b	1,443	c	0,059	b	0,082	b	0,142	b
	2 %	0,918	b	0,171	a	1,089	b	0,085	b	0,026	a	0,111	ab
	4 %	0,839	b	0,280	a	1,119	b	0,067	b	0,028	a	0,094	ab
	8 %	0,138	a	0,281	a	0,419	a	0,031	a	0,039	ab	0,069	a
<i>O. anthropi</i>	0 %	0,948	b	0,542	a	1,489	b	0,064	b	0,058	a	0,123	a
	2 %	0,931	b	0,219	a	1,150	b	0,089	c	0,022	a	0,112	a
	4 %	0,759	b	0,316	a	1,075	b	0,085	bc	0,036	a	0,121	a
	8 %	0,081	a	0,412	a	0,494	a	0,009	a	0,062	a	0,070	a
C o n s o r c i o bacteriano	0 %	0,935	b	0,554	b	1,489	b	0,101	a	0,122	a	0,223	a
	2 %	0,907	b	0,133	a	1,041	ab	0,083	a	0,019	a	0,102	a
	4 %	0,695	ab	0,262	a	0,957	a	0,079	a	0,024	a	0,103	a
	8 %	0,364	a	0,675	b	1,039	ab	0,097	a	0,094	a	0,192	a

GLI: Glifosato. **GLI:** 0 % (0 mL L⁻¹), 2 % (4,36 mL L⁻¹), 4 % (8,71 mL L⁻¹) y 8 % (17,42 mL L⁻¹). **X:** promedio. **TF:** Tallo fresco (g); **RF:** Raíz fresca (g); **TRF:** Tallo + raíz fresca (g); **TS:** Tallo seco (g); **RS:** Raíz seca (g); **TRS:** Tallo raíz seca (g). **X:** promedio. Las diferentes letras indican diferencias significativas en $p < 0,05$. / **GLI:** Glyphosate. **GLI:** 0 % (0 mL L⁻¹), 2 % (4.36 mL L⁻¹), 4 % (8.71 mL L⁻¹) and 8 % (17.42 mL L⁻¹). **X:** average. **TF:** Fresh stem (g); **RF:** Fresh root (g); **TRF:** Stem + fresh root (g); **TS:** Dry stem (g); **RS:** Dry root (g); **TRS:** Dry stem root (g). **X:** average. The different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

de la raíz y el tallo en el día 21 (Cuadro 5). *P. aeruginosa* mostró un NOEC más alto para el peso seco del tallo y un LOEC más bajo para el peso fresco de la raíz y el total de la raíz (Cuadro 5).

Ochrobactrum anthropi presentó un NOEC más alto para el peso fresco, el peso seco de la raíz y el peso seco total (Cuadro 5). El valor de LOEC fue más bajo para la longitud de la raíz y el tallo para el día 18 y la longitud del tallo para el día 21 (Cuadro 5). Además, el grupo inoculado con el consorcio bacteriano mostró un NOEC más alto para la biomasa fresca y seca, y un LOEC más bajo para la longitud de la raíz para el día 21 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Datos de NOEC (No Observed Effect Concentration) y LOEC (Lowest Observed Effect Concentration) del glifosato sobre el *Pisum sativum* en presencia de microorganismos. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero de Lima, Perú.

Table 5. NOEC (concentración de efectos no observables) and LOEC (concentración más baja de efectos observables) data of glyphosate on *Pisum sativum* in the presence of microorganisms. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse of Lima, Peru.

Parámetro evaluado	Día evaluado	NOEC / LOEC	Sin bacterias	<i>P. aeruginosa</i>	<i>O. anthropi</i>	Consortio bacteriano
Longitud de la raíz	21	NOEC	<2 %	<2 %	<2 %	2 %
		LOEC	2 %	2 %	2 %	4 %
Longitud media de tallo	14	NOEC	2 %	4 %	2 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	4 %	8 %
Longitud media de tallo	16	NOEC	2 %	4 %	2 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	4 %	8 %
Longitud media de tallo	18	NOEC	2 %	4 %	<2 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	2 %	8 %
Longitud media de tallo	21	NOEC	<2 %	4 %	<2 %	4 %
		LOEC	2 %	8 %	2 %	8 %
Biomasa del tallo fresco	21	NOEC	2 %	4 %	4 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	8 %	8 %
Biomasa de la raíz fresca	21	NOEC	4 %	<2 %	8 %	8 %
		LOEC	8 %	2 %	>8 %	>8 %
Biomasa fresca total (raíz + tallo)	21	NOEC	2 %	<2 %	4 %	8 %
		LOEC	4 %	2 %	8 %	>8 %
Biomasa del tallo seco	21	NOEC	8 %	4 %	4 %	8 %
		LOEC	>8 %	8 %	8 %	>8 %
Biomasa de la raíz seco	21	NOEC	4 %	8 %	8 %	8 %
		LOEC	8 %	>8 %	>8 %	>8 %
Biomasa seca total (raíz + tallo)	21	NOEC	4 %	4 %	8 %	8 %
		LOEC	8 %	8 %	>8 %	>8 %

Discusión

Se observaron diferencias significativas en la CE en los tratamientos con microorganismos en presencia de GLI. Específicamente, los tratamientos que incluían *P. aeruginosa* u *O. anthropi* mostraron una disminución en la CE a medida que aumentaba la concentración de GLI. Sin embargo, se ha demostrado una disminución significativa de la CE con la incorporación de GLI (Hou et al., 2020).

Los valores de pH se encontraron dentro del rango adecuado para la biodegradación del GLI por *P. aeruginosa* y *O. anthropi* (Singh et al., 2020). El pH no se ve afectado por la aplicación del herbicida, ya que las sales o ácidos contenidos no lo alteran significativamente (Abahonza de la Cruz et al., 2022). Sin embargo, a largo plazo, la ausencia de materia orgánica puede reducir la producción de ácidos, lo que lleva a suelos con características más alcalinas (Abahonza de la Cruz et al., 2022).

Diversas variaciones en la calidad de la materia orgánica pueden atribuirse principalmente a la interacción entre el suelo y las plantas (Abahonza de la Cruz et al., 2022; Singh et al., 2019). Esta interacción genera la liberación de exudados vegetales en el suelo. Estos exudados ocurren como resultado del daño sufrido por los

tejidos de las plantas (Cheloufi et al., 2017). En la presente investigación a la más alta concentración de GLI, se observó un aumento en la materia orgánica.

El fósforo disponible en el suelo aumentó con la aplicación de GLI al 8 % en los tratamientos con suelo y suelo más *P. sativum*. Este incremento podría atribuirse a la disponibilidad de fosfato en la estructura del GLI (Hébert et al., 2018) y a la influencia del consorcio microbiano en la disponibilidad de P mediante la vía CP liasa (Hove-Jensen et al., 2014). Además, la disponibilidad del P para las plantas puede alterado debido a formulaciones bajas de GLI (Chávez Ortiz et al., 2022).

Los hallazgos sugieren una interacción entre el GLI, las bacterias del suelo y la disponibilidad de K en suelos con *P. sativum*. Se observó que el GLI inhibe la absorción de nutrientes por parte de la planta (Mertens et al., 2018). Por otro lado, *O. anthropi* y el consorcio bacteriano, parecen contrarrestar este efecto, lo que resulta en un aumento de los niveles de K a mayores concentraciones de GLI (Obour et al., 2016).

En el grupo sin microorganismos, la biomasa fresca del tallo de *P. sativum* disminuyó significativamente a concentraciones más altas de GLI, lo que sugiere inhibición del crecimiento (Fernandes et al., 2020). A concentraciones bajas de GLI el peso seco total de la planta aumentó. Por otro lado, a concentraciones elevadas de GLI disminuyó el peso seco total de la planta (Silva et al., 2016).

En el caso de otra especie de la familia fabácea como los guisantes, la biomasa de los brotes en el tallo se redujo en mayor medida que la biomasa de las raíces, lo que indica que el efecto de GLI se observó en mayor medida en tallos que en raíces (Smedbol et al., 2019). Respecto a la biomasa seca, se encuentran diferencias significativas en la raíz y la biomasa seca total a la concentración mayor de GLI. La diferencia entre la biomasa fresca y la biomasa seca puede atribuirse a la reducción en el contenido de agua de la planta en respuesta al estrés inducido por el herbicida (González Ortega & Fuentes Ponce, 2022).

Los resultados sugieren una respuesta diferencial en las plantas al GLI con *P. aeruginosa*. Se ha demostrado que el uso de *P. aeruginosa* mejora la biomasa fresca de las plantas con GLI en el suelo, posiblemente debido a la solubilización de nutrientes y la producción de hormonas vegetales (Mohy-Ud-Din et al., 2023). En cuanto a la biomasa seca de la raíz, bioamasa seca del tallo y biomasa seca total, se detectaron diferencias a las tres concentraciones de GLI. Estos hallazgos sugieren que, aunque la biomasa seca total disminuye en presencia de GLI, el impacto en la raíz es más pronunciado que en el tallo, lo que puede indicar una mayor sensibilidad de las raíces al herbicida.

El grupo tratado con *O. anthropi* mostró una disminución significativa en la biomasa fresca del tallo y la biomasa fresca total bajo la concentración más alta de GLI. Esto sugiere que el GLI en niveles altos inhibe el crecimiento del tallo y, por ende, el desarrollo general de la planta (Pedemonte, 2017). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la biomasa fresca de la raíz, lo que sugiere una posible resistencia o adaptación de las raíces a las concentraciones de GLI utilizadas en el estudio, posiblemente mediada por la presencia de la bacteria *O. anthropi* (Singh et al., 2020).

No se observaron diferencias en la biomasa seca de la raíz, ni en la biomasa seca total, lo que indica que, aunque el GLI afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas de alverja, su efecto puede no ser tan evidente en la biomasa seca de la planta (Dawood et al., 2019). Se encontraron efectos en la biomasa fresca del tallo, raíz y biomasa fresca total en respuesta al GLI con el consorcio bacteriano. Aunque se observó una reducción en la biomasa fresca del tallo, de la raíz, y total, no se encontraron diferencias significativas en la biomasa seca, lo que sugiere un efecto transitorio del GLI en presencia de este consorcio bacteriano (Bhatt et al., 2021).

En concentraciones más altas de GLI, se observó una reducción en el crecimiento radicular, posiblemente debido a la bioacumulación del GLI (Ali et al., 2020). Sin embargo, el consorcio bacteriano mostró un efecto positivo en la longitud del tallo y raíz, comparado con bacterias individuales (Bhatt et al., 2021). En la longitud del tallo, se revelaron patrones en cuanto al efecto de diferentes concentraciones de GLI (Ali et al., 2020), lo que es consistente con los resultados observados en la longitud de la raíz.

En los tratamientos con *P. aeruginosa* y consorcio bacteriano, las concentraciones más bajas de GLI mostraron valores más elevados de longitud de tallo, lo que sugiere una posible influencia de la degradación del GLI (Gustinasari et al., 2021). Además, esta tendencia podría estar relacionada con la capacidad de la *P. aeruginosa* y del consorcio bacteriano para modular los efectos del GLI en el crecimiento de las plantas, lo cual mantiene la longitud del tallo en niveles comparables al grupo control. Se sugiere una interacción beneficiosa entre estas bacterias promotoras del crecimiento y las plantas en presencia de GLI (Ali et al., 2020; Shahid et al., 2018).

En el día 21 se mantuvieron las diferencias entre las concentraciones de GLI en la longitud del tallo para los grupos sin bacterias y *O. anthropi*. Este resultado indica efectos a largo plazo de estas concentraciones de GLI en el crecimiento de la planta (Morrás et al., 2022). De igual forma se sugiere una posible adaptación o resistencia a concentraciones más bajas de GLI, lo que podría implicar la capacidad de mantener el efecto de degradación en el GLI, a pesar de la presencia de concentraciones moderadas del GLI (Morrás et al., 2022).

Se observó un beneficio en la longitud media de la raíz en presencia del consorcio bacteriano bajo altas concentraciones de GLI. Se registró incrementos del tamaño de la raíz, en comparación con *P. aeruginosa* y *O. anthropi*. Estos aumentos no mostraron diferencia en relación con el grupo sin bacterias, indicando un posible efecto positivo de las bacterias en el crecimiento radicular (Bhatt et al., 2021). El incremento en la longitud del tallo, en presencia del consorcio bacteriano a las más altas concentraciones de GLI, indica que las bacterias, podrían degradar el GLI, lo que a su vez mitigaría sus efectos negativos en el crecimiento de las plantas (Góngora Echevarría et al., 2020). no en referencias

Conclusiones

Se demostró la toxicidad del glifosato en la biomasa de la raíz, tallo y raíz + tallo de *Pisum sativum* (arveja) en suelo franco-arenoso, con la presencia de las bacterias *Ochrobactrum anthropi* y *Pseudomonas aeruginosa* de forma individual y en un consorcio bacteriano conformado por ambos microorganismos. *Pisum sativum* expuesto a las concentraciones más altas de glifosato evidenció una reducción significativa en el crecimiento, particularmente en la biomasa fresca del tallo y la raíz, pero al aplicarse un consorcio bacteriano revirtió y atenuó este efecto, lo que mejoró el crecimiento de *P. sativum*, de manera diferencial según la parte de la planta evaluada (raíz, tallo y total; tallo y raíz).

El glifosato modificó el pH y la conductividad eléctrica del suelo, aunque la materia orgánica no cambió. El potasio disponible en el suelo aumentó con las concentraciones más altas de glifosato, pero las bacterias disminuyeron dicho efecto, y el fósforo incrementó en presencia de *P. sativum* y glifosato a la concentración más alta. Estos hallazgos destacan para futuras investigaciones la necesidad de considerar un enfoque holístico que contemple la interacción del sistema planta-herbicida-microorganismo para lograr una gestión agrícola sostenible, que conserve el suelo, maximice el rendimiento y garantice la inocuidad alimentaria.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento realizado por la Universidad Científica del Sur, Lima, Perú, a través del concurso de fondos para proyectos de tesis (Resolución Directoral Académica de carrera N°097-2022-DACIA-DAFCA-U. CIENTIFICA). La presente investigación fue aprobada por el Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur (Constancia N° 057-CIEI-AB-CIENTIFICA-2022).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Abahonza de la Cruz, D. V., Benavides Mejía, O. A., Fajardo Escobar, C. P., & Huertas Delgado, J. L. (2022). Remediación de suelos degradados con glifosato a partir de enmiendas orgánicas a escala laboratorio. En J. L. Huertas Delgado, L. N. Torres Martínez, L. G. Lafaurie Gomez, & J. E. Insuasty Enríquez (Eds.), *Las ciencias ambientales y su avance sin fronteras durante la pandemia* (pp. 153–167). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.171.c222>
- Alache Lizarbe, L., Vega Córdova, E., & Lizarbe Córdova, J. (2020). Adaptación y eficiencia agronómica en el maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en diferentes localidades de la costa central y norte del Perú. *Boletín Redipe*, 9(11), 260–271. <https://doi.org/10.36260/rbr.v9i11.1129>
- Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-Daim, M. M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M., & Kalderis, D. (2020). Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: a review. *Sustainability*, 12(5), Article 1927. <https://doi.org/10.3390/su12051927>
- Arispe Vázquez, J. L., Cadena Zamudio, D. A., Tamayo Esquer, L. M., Noriega Cantú, D. H., Toledo-Aguilar, R., Felipe-Victoriano, M., Barrón-Bravo, O. G., Reveles-Hernández, M., Ramírez Sánchez, S. E., & Espinoza Ahumada, C. A. (2023). A review of the current panorama of glyphosate resistance among weeds in Mexico and the rest of the world. *Agro Productividad*, 16(7), 135-149. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i7.2618>
- Badii, M. H., & Varela, S. (2015). Insecticidas Organofosforados: Efectos sobre la Salud y el Ambiente. *CULCYT, Cultura Científica y Tecnológica*, 28(5), 5-17. <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/375>
- Bautista, J. I., & Arévalo, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26(2), 20-28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Bhatt, P., Bhatt, K., Sharma, A., Zhang, W., Mishra, S., & Chen, S. (2021). Biotechnological basis of microbial consortia for the removal of pesticides from the environment. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(3), 317-338. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1853032>
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Cantaro Segura, H. B. (2019). *Reguladores de crecimiento en el cultivo de arveja (Pisum sativum L.) cv. Rondo en La Molina* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3893>
- Carrero, A., Zambrano, A., Hernández, E., Contreras, F., Machado, D., Bianchi, G., & Varela, R. (2015). Comparación de dos métodos de extracción de fósforo disponible en un suelo ácido. *Avances en Química*, 10(Especial), 29-33. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/avancesenquimica/article/view/6931>
- Castrejón Godínez, M. L., Tovar Sánchez, E., Valencia Cuevas, L., Rosas Ramírez, M. E., Rodríguez, A., & Mussali Galante, P. (2021). Glyphosate pollution treatment and microbial degradation alternatives, a review. *Microorganisms*, 9(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112322>

- Chávez Ortiz, P., Tapia Torres, Y., Larsen, J., & García Oliva, F. (2022). Glyphosate-based herbicides alter soil carbon and phosphorus dynamics and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 169, Article 104256. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104256>
- Cheloufi, R., Messaadia, H., & Alayat, H. (2017). Biodegradation of herbicides by *Pseudomonas aeruginosa* in two soils types of the Bou Namoussa irrigable perimeter (Algerian Extreme Northeast): Effects on mineral nutrition (P_2O_5 and NO_3). *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(7), 2513–2521. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol8/vol8_N7/270-JMES-2713-Cheloufi.pdf
- Ezaka, E., Akintokun, A. K., Akintokun, P. O., Taiwo, L. B., Uthman, A. C. O., Oyedele, O. A., & Aluko, O. I. (2018). Glyphosate degradation by two plant growth promoting bacteria (PGPB) isolated from rhizosphere of maize. *Microbiology Research Journal International*, 26(6), 1–11. <https://doi.org/10.9734/mrji/2018/v26i630081>
- Fernandes, B., Soares, C., Braga, C., Rebotim, A., Ferreira, R., Ferreira, J., Fidalgo, F., Pereira, R., & Cachada, A. (2020). Ecotoxicological assessment of a glyphosate-based herbicide in cover plants: *Medicago sativa* L. as a model species. *Applied Sciences*, 10(15), Article 5098. <https://doi.org/10.3390/app10155098>
- Grewal, K., Kumar, S., Amin Bhat, M., & Dinesh. (2017). Comparison of chemical extractants for determination of available potassium. *International Journal of Chemical Studies*, 5(6), 417–423. <https://www.chemijournal.com/archives/2017/vol5issue6/PartF/5-5-369-532.pdf>
- Gustinasari, K., Pandebsie, E. S., Syafei, A. D., & Hermana, J. (2021). Phytotoxicity of glyphosate-based herbicide to *Typha angustifolia* and *Vetiveria zizanioides* and its effect on rhizosphere bacteria. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(3), Article 45. <https://doi.org/10.1007/s41204-021-00140-1>
- Gutiérrez, R. E., & Cáceres, C. A. (2018). Correlación entre la conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación del suelo y en extractos con cinco relaciones sueloagua. *ALFA*, 2(6), 144–156. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v2i6.46>
- González Ortega, E., & Fuentes Ponce, M. H. (2022). Dinámica del glifosato en el suelo y sus efectos en la microbiota. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 127–144. <https://doi.org/10.20937/RICA.54197>
- Hébert, M., Fugère, V., & Gonzalez, A. (2018). The overlooked impact of rising glyphosate use on phosphorus loading in agricultural watersheds. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(1), 48–56. <https://doi.org/10.1002/fee.1985>
- Heck, K., De Marco, É. G., Duarte, M. W., Salamoni, S. P., & Van Der Sand, S. (2015). Pattern of multiresistant to antimicrobials and heavy metal tolerance in bacteria isolated from sewage sludge samples from a composting process at a recycling plant in southern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), Article 328. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4575-6>
- Hou, W. J., Zou, M., Li, B. F., & Yu, Y. C. (2020). Effect of glyphosate on soil physicochemical properties of *Eucalyptus* plantations. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(8), 20–26. <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20200803>
- Hove-Jensen, B., Zechel, D. L., & Jochimsen, B. (2014). Utilization of glyphosate as phosphate source: biochemistry and genetics of bacterial carbon-phosphorus lyase. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 78(1), 176–197. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00040-13>
- Ledoux, M., Hettiarachchy, N., Xiofan, Y., Howard, L., & Lee, S. (2020). Penetration of glyphosate into the food supply and the incidental impact on the honey supply and bees. *Food Control*, 109, Article 106859. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106859>
- Mohy-Ud-Din, W., Chen, F., Bashir, S., Akhtar, M. J., Asghar, H. N., Farooqi, Z. U. R., Zulfiqar, U., Haider, F. U., Afzal, A., &

- Alqahtani, M.D. (2023). Unlocking the potential of glyphosate-resistant bacterial strains in biodegradation and maize growth. *Frontiers in Microbiology*, 19, Article 1285566. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1285566>
- Morrás, H., Behrends Kraemer, F., Sainz, D., Fernández, P., & Chagas, C. (2022). Soil structure and glyphosate fate under no-till management in the Pampa region. II. Glyphosate and AMPA persistence and spatial distribution in the long-term. A conceptual model. *Soil and Tillage Research*, 223, Article 105471.
- Obour, A. K., Stahlman, P. W., & Holman, J. D. (2016). Soil chemical properties as influenced by long-term glyphosate-resistant corn and soybean production in the central Great Plains, USA. *Geoderma*, 277, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.029>
- Pedemonte, F. (2017). *Problemática del uso de glifosato* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3011>
- Pronk, G. J., Heister, K., Vogel, C., Babin, D., Bachmann, J., Ding, G. C., Ditterich, F., Gerzabek, M. H., Giebler, J., Hemkemeyer, M., Kandeler, E., Kunhi Mouvenchery, Y., Miltner, A., Poll, C., Schaumann, G. E., Smalla, K., Steinbach, A., Tanuwidjaja, I., Tebbe, C. C., ... Kögel-Knabner, I. (2017). Interaction of minerals, organic matter, and microorganisms during biogeochemical interface formation as shown by a series of artificial soil experiments. *Biology and Fertility of Soils*, 53(1), 9–22. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1161-1>
- Rossi, F., Carles, L., Donnadieu, F., Batisson, I., & Artigas, J. (2021). Glyphosate-degrading behavior of five bacterial strains isolated from stream biofilms. *Journal of Hazardous Materials*, 420, Article 126651. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126651>
- Shahid, M., Ahmed, B., Zaidi, A., & Khan, M. S. (2018). Toxicity of fungicides to *Pisum sativum*: A study of oxidative damage, growth suppression, cellular death and morpho-anatomical changes. *RSC Advances*, 67, 38483-38498. <https://doi.org/10.1039/c8ra03923b>
- Silva, F. M. L., Duke, S. O., Dayan, F. E., & Velini, E. D. (2016). Low doses of glyphosate change the responses of soyabean to subsequent glyphosate treatments. *Weed Research*, 56(2), 124–136. <https://doi.org/10.1111/wre.12189>
- Singh, S., Kumar, V., Sidhu, G., Datta, S., Singh, D., Koul, B., Singh, H., & Singh, J. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria from heavy metal contaminated soil promote growth attributes of *Pisum sativum* L. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 665–671. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.01.035>
- Singh, S., Kumar, V., Gill, J. P. K., Datta, S., Singh, S., Dhaka, V., Kapoor, D., Wani, A. B., Dhanjal, D. S., Kumar, M., Harikumar, S. L., & Singh, J. (2020). Herbicide glyphosate: Toxicity and microbial degradation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), Article 7519. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>
- Smedbol, É., Lucotte, M., Maccario, S., Gomes, M. P., Paquet, S., Moingt, M., Mercier, L. L. C., Sobarzo, M. R. P., & Blouin, M. A. (2019). Glyphosate and Aminomethylphosphonic Acid Content in Glyphosate-Resistant Soybean Leaves, Stems, and Roots and Associated Phytotoxicity Following a Single Glyphosate-Based Herbicide Application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(22), 6133–6142. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00949>
- Suwardji, S., & Sudantha, I. M. (2021). The fate of glyphosate in soil and water: A review. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 7(Special Issue), 389–399. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v7iSpecialIssue.971>
- Tofiño Rivera, A., Carbone Murgas, R., Melo Rios, A., & José Merini, L. (2020). Efecto del glifosato sobre el microbiota, calidad del suelo y cultivo de frijol biofortificado en el departamento del Cesar, Colombia. *Revista Argentina de Microbiología*, 52(1), 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.01.006>

- Villareal, R. (2018). *Variación temporal de las propiedades físicas del suelo y su impacto en la dinámica del glifosato en suelos bajo siembra directa y labranza convencional* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio SEDICI de la Universidad de Nacional de La Plata. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/72021>
- Xu, X., Luo, Q., Zhang, N., Wu, Y., Wei, Q., Huang, Z., & Dong, C. (2024). Sandy loam soil maintains better physicochemical parameters and more abundant beneficial microbiomes than clay soil in *Stevia rebaudiana* cultivation. *PeerJ*, 12, Article e18010. <https://doi.org/10.7717/peerj.18010>

Manuscrito aceptado