



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

Toxicity of glyphosate on snow pea (*Pisum sativum*) in 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.º N°097-2022-DACIA-DAFCA-U. CIENTÍFICA), 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>); joseiannacone@gmail.com (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0003-3699-4732>).

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 manera individual y en un consorcio bacteriano conformado por ambos microorganismos. **Materiales y métodos.** El experimento se llevó a cabo en un invernadero en Lima, Perú. Se realizó un diseño completamente aleatorizado con 32 tratamientos, cuyo suelo se mezcló con GLI y fue sometido a análisis edafológicos. Cuatro tratamientos fueron controles, doce contenían suelo con *O. anthropi* y *P. aeruginosa* de forma individual y en un consorcio bacteriano, y dieciséis 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 mejoró 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 de *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 widely used herbicide that, when applied in excess, can affect both broadleaf weeds and crops. Plant growth-promoting bacteria may enhance crop resistance and protection against GLI effects. **Objective.** To evaluate GLI toxicity on the root, stem, and combined root + stem of *Pisum sativum* in sandy loam soil, in the presence of *Ochrobactrum anthropi* and *Pseudomonas aeruginosa*, both individually and as a bacterial consortium composed of both microorganisms. **Materials and methods.** The experiment was conducted in a greenhouse in Lima, Peru, using a completely randomized design with 32 treatments. Soil was mixed with GLI and subjected to edaphological analysis. Four treatments served as controls, twelve contained soil with *O. anthropi* and *P. aeruginosa* individually and on their bacterial consortium, and sixteen treatments included *P. sativum*. **Results.** *P. sativum* exposed to 8.71 mL L⁻¹ and 17.42 mL L⁻¹ of GLI showed a significant growth reduction, particularly in fresh stem and root biomass. However, bacterial consortium reversed this effect and improved growth. GLI altered soil pH and electrical conductivity, while organic matter remain unchanged. Soil available potassium increased with GLI, but bacterial presence reduced this effect. Available phosphorus increased in treatments combining *P. sativum* and GLI at 17.42 mL L⁻¹. **Conclusions.** Higher GLI concentrations negatively impacted *P. sativum* stem and root growth, but bacterial inoculation attenuated these effects and modified soil properties. These findings highlight 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 humanidad (Burbano-Orjuela, 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 y se distingue por un pH alcalino, niveles moderados de fósforo, alta disponibilidad de potasio, baja presencia de materia orgánica y alta conductividad eléctrica (Lizarbe Alache et al., 2020).

Para garantizar la productividad agrícola, se recurre frecuentemente a la aplicación de plaguicidas, entre ellos los organofosforados (Badii et al., 2015). El glifosato (GLI) es un herbicida posemergente de amplio espectro (Arispe-Vázquez et al., 2023). Este plaguicida sistémico, perteneciente al grupo de los organofosforados, se utiliza 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 componentes inertes (Ledoux et al., 2020).

El GLI es uno de los herbicidas más utilizados a nivel mundial. En Perú, se comercializa bajo más de 30 marcas diferentes (Pedemonte Castro, 2017). Su capacidad de adherencia al suelo depende de sus propiedades fisicoquímicas (Ledoux et al., 2020). En suelos con textura franco-arenosa, su movilidad es limitada, lo que reduce su probabilidad de alcanzar las aguas subterráneas, especialmente más allá de los 15 cm de profundidad (Villarreal, 2018). La aplicación de GLI se relaciona con cambios en la actividad, cantidad y composición de la comunidad microbiana del suelo (Romano Armada et al., 2019), lo cual afecta la calidad química y física de este (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, niveles 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 este herbicida en un periodo de 120 a 400 horas (Rossi et al., 2021). Se ha documentado la capacidad de degradación de GLI por veintiocho especies bacterianas, incluido 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 se utiliza frecuentemente como planta bioindicadora (Singh et al., 2019). Esta especie es ideal para evaluar los efectos adversos del GLI (Singh et al., 2020). Además, presenta cambios en su crecimiento y, debido a su bajo costo, resulta adecuada para la investigación (Cantaro Segura, 2019). Este estudio tuvo como 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 manera individual y en un consorcio bacteriano conformado por ambos microorganismos.

Materiales y métodos

Sitio y periodo experimental

El estudio fue aprobado por el Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur (Constancia n.º 057-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2022) y se llevó a cabo en un invernadero de dicha universidad, ubicado en Villa El Salvador, Lima, Perú (latitud: -12.220000, longitud: -76.978056), a 5 m s. n. m. En el invernadero se registró una temperatura promedio de 20 °C y una humedad relativa del 70 %. El periodo experimental abarcó de octubre de 2022 a 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 g/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 uno 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. Por su parte, la bacteria *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 diluyeron 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 que incluyó 32 tratamientos distribuidos en un total de 96 macetas. Consistió en doce 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 a T4). Los tratamientos T5 a T16 incluyeron suelo inoculado con grupos bacterianos de *P. aeruginosa*, *O. anthropi* y el

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 en 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 in Lima, Peru.

Tratamientos	Sin glifosato (control)	Con glifosato		
		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 a T16 equivalen a los tratamientos sin *P. sativum* aplicado en mL L⁻¹ y T17 a T32 equivalen al suelo con los diferentes tratamientos con *P. sativum* y los grupos bacterianos. / T1 to T16 refer to treatments without *P. sativum* applied in mL L⁻¹, and T17 to T32 refer to soil treated with *P. sativum* and bacterial groups.

consorcio bacteriano, para un total de 36 macetas. Los 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* se incubaron 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. Las bacterias se inocularon 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 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 en 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 de clorinada de 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 manera 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, considerando el peso fresco del tallo y la raíz. La biomasa seca se obtuvo del peso seco del tallo y la raíz.

Parámetros edafológicos después del proceso de la aplicación del glifosato

Los parámetros edafológicos evaluados incluyeron la materia orgánica, determinada mediante el método de oxidación húmeda con una solución titulante compuesta por sulfato ferroso, según el procedimiento de Walkley-Black, y multiplicada por el factor 1,724 (Izquierdo Bautista & Arévalo Hernández, 2021); la conductividad eléctrica (CE), obtenida del extracto de la pasta saturada (Merani et al., 2019), y el pH, medido a partir de la lectura del extracto de relación suelo-agua 1:1 (Gutiérrez & Cáceres, 2018). Además, el potasio disponible (K^+) se determinó por medio del extracto de acetato de amonio 1N (Grewal et al., 2017), y el fósforo (P) se midió con el método de Olsen modificado (Carrero et al., 2015).

Análisis estadístico

Se implementó un diseño completamente aleatorizado para los 32 tratamientos, que incluyó mediciones de longitud de raíz y tallo, biomasa 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 cumplían 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 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).

pH

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 aumentó 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).

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 en Lima, Perú.

Table 2. Effect of glyphosate (GLI) at different concentrations in microbial presence on edaphological parameters in soil and soil + *Pisum sativum*. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse in 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 presentados en el Cuadro 1. **X** = Promedio. Las letras distintas indican diferencias significativas en $p < 0,05$. **MO**: materia orgánica; **CE**: conductividad eléctrica. / T1 to T32 correspond to the treatments listed in Table 1. **X** = Mean. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. **MO**: dry matter; **CE**: electrical conductivity.

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).

Fósforo (P)

En las macetas con suelo, los tratamientos de suelo sin bacterias, con GLI al 0 % mostraron un valor diferente respecto al GLI al 2 % y 8 % (Cuadro 2). En el suelo + consorcio bacteriano, el P no presentó diferencias entre las concentraciones de GLI al 4 % y 8 % en comparación con el 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 % exhibió niveles bajos de P, con diferencias en relación con el GLI al 4 % y 8 % (Cuadro 2).

Potasio (K)

En las macetas con suelo, los tratamientos con distintas concentraciones de GLI no evidenciaron un efecto significativo sobre el K (Cuadro 2). En suelo + *P. aeruginosa*, el GLI al 0 % mostró una diferencia significativa frente al GLI al 2 % y 4 % (Cuadro 2). En suelo + consorcio bacteriano, el GLI al 0 % exhibió una diferencia significativa únicamente respecto a 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*, la longitud media de la raíz fue mayor en ausencia de GLI (0 %) (Cuadro 3). Las concentraciones de GLI al 4 % y 8 % redujeron significativamente la longitud de la 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 al día 14, el suelo sin bacterias mostró diferencias significativas entre GLI al 0 %, 2 % y 8 % (Cuadro 3).

En el GLI al 8 %, la longitud del tallo a 14 días mostró diferencias frente a las demás concentraciones (Cuadro 3). Los tratamientos a 14 días presentaron diferencias entre GLI al 0 % y GLI al 4 % y 8 % (Cuadro 3). Para el GLI al 2 %, la longitud media del tallo difirió con respecto al 8 % (Cuadro 3). En suelo + consorcio bacteriano, las concentraciones de GLI al 0 %, 2 % y 4 % exhibieron valores de longitud media del tallo que evidenciaron una diferencia en relación con el GLI al 8 % (Cuadro 3). En el día 21, las concentraciones de GLI al 0 %, 2 % y 4 % registraron longitudes mayores en comparación con el 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 distintas concentraciones de GLI (Cuadro 4). Para el tallo, el control sin GLI (0 mL L⁻¹) mostró una disminución del peso fresco conforme aumentó la concentración (Cuadro 4). En cuanto a la raíz, se encontraron pesos frescos diferentes en las 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 la total se redujeron con GLI al 8 % (Cuadro 4). No se observaron diferencias en la biomasa fresca de la raíz bajo concentraciones de GLI (Cuadro 4).

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

Table 3. Effect of glyphosate at different concentrations in microbial presence on root and stem length of *Pisum sativum* at different treatment periods. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse in 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 letras distintas 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** = Mean. **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** = Mean. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

En el grupo con el consorcio bacteriano, se registró una disminución del 61,07 % en la biomasa fresca del tallo con GLI al 8 % en comparación con el control (Cuadro 4).

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

Con 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 detectaron diferencias significativas en la longitud media de la raíz entre los distintos grupos bacterianos (Cuadro 2). Con GLI al 4 %, el grupo con consorcio bacteriano mostró una diferencia significativa en relación con el grupo *O. anthropi* (Cuadro 2). Con GLI al 8 %, el consorcio bacteriano presentó diferencias significativas respecto a *P. aeruginosa* (Cuadro 2).

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 *Pisum sativum* en diferentes días de tratamiento. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero en Lima, Perú.

Table 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 *Pisum sativum* at different treatment periods. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse in 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
Consortio 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). Las letras distintas 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**= Mean. **TF:** Fresh stem (g); **RF:** Fresh root (g); **TRF:** Stem + fresh root (g); **TS:** Dry stem (g); **RS:** Dry root (g); **TRS:** Stem + dry root (g). Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

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 correspondió a la longitud de la raíz y del 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 del tallo en el día 18, y la longitud del tallo en 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 en el día 21 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Datos de NOEC (concentración de efectos no observables) y LOEC (concentración más baja de efectos observables) del glifosato sobre *Pisum sativum* en presencia de microorganismos. Entre octubre de 2022 y junio de 2023, en un invernadero en Lima, Perú.

Table 5. No Observed Effect Concentration (NOEC) and Lowest Observed Effect Concentration (LOEC) data of glyphosate on *Pisum sativum* in the presence of microorganisms. From October 2022 to June 2023, in a greenhouse in 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 del tallo	14	NOEC	2 %	4 %	2 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	4 %	8 %
Longitud media del tallo	16	NOEC	2 %	4 %	2 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	4 %	8 %
Longitud media del tallo	18	NOEC	2 %	4 %	<2 %	4 %
		LOEC	4 %	8 %	2 %	8 %
Longitud media del 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 seca	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 conductividad eléctrica (CE) en los tratamientos con microorganismos en presencia de GLI. En particular, aquellos que incluían *P. aeruginosa* u *O. anthropi* mostraron una disminución de este parámetro conforme aumentaba la concentración de GLI. Sin embargo, se ha demostrado una reducción 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 de este herbicida, ya que las sales o ácidos que contiene no lo alteran significativamente (Abahonza de la Cruz et al., 2022). No obstante, a largo plazo, la ausencia de materia orgánica puede reducir la producción de ácidos, lo que provoca que los suelos presenten 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 como resultado del daño sufrido por los tejidos de las plantas (Cheloufi et al., 2017). En la presente investigación, a la concentración más alta de GLI, se observó un incremento 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 de P para las plantas puede verse alterada por 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 del herbicida (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 cual sugiere inhibición del crecimiento (Fernandes et al., 2020). A concentraciones bajas, el peso seco total de la planta aumentó, mientras que en niveles elevados se redujo (Silva et al., 2016).

En el caso de los guisantes, otra especie de la familia fabácea, la biomasa de los brotes en el tallo disminuyó en mayor medida que la de las raíces, lo que indica que el efecto del GLI fue más notorio en tallos que en raíces (Smedbol et al., 2019). Respecto a la biomasa seca, se hallaron diferencias significativas en la raíz y la biomasa seca total a la mayor concentración 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 al GLI en las plantas con *P. aeruginosa*. Se ha demostrado que el uso de esta bacteria 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, la biomasa seca del tallo y la biomasa seca total, se detectaron diferencias en las tres concentraciones de GLI. Estos hallazgos sugieren que, aunque la biomasa seca total disminuye en presencia del herbicida, el impacto en la raíz es más pronunciado que en el tallo, lo que podría indicar una mayor sensibilidad de las raíces al GLI.

El grupo tratado con *O. anthropi* mostró una reducción 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 elevados inhibe el crecimiento del tallo y, por ende, el desarrollo general de la planta (Pedemonte Castro, 2017). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la biomasa fresca de la raíz, lo cual indica 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 impacto puede no ser tan evidente en la biomasa seca (Dawood et al., 2019). Se encontraron efectos en la biomasa fresca del tallo, la biomasa fresca de la raíz y la biomasa fresca total en respuesta al GLI con el consorcio bacteriano. Se identificó una reducción en la biomasa fresca del tallo, la raíz y la total; no obstante, no se hallaron diferencias significativas en la biomasa seca. Esto sugiere un efecto transitorio del GLI en presencia del 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 herbicida (Ali et al., 2020). Sin embargo, el consorcio bacteriano mostró un efecto positivo en la longitud del tallo y la raíz, comparado con bacterias individuales (Bhatt et al., 2021). En la longitud del tallo, se identificaron patrones en cuanto al efecto de diferentes concentraciones de GLI (Ali et al., 2020), lo cual coincide con los resultados obtenidos en la longitud de la raíz.

En los tratamientos con *P. aeruginosa* y consorcio bacteriano, las concentraciones más bajas de GLI mostraron valores más altos en la longitud del tallo, lo que sugiere una posible influencia de la degradación del herbicida

(Gustinasari et al., 2021). Esta tendencia podría estar relacionada con la capacidad de *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 similares al grupo control. Se sugiere una interacción beneficiosa entre estas bacterias promotoras del crecimiento y las plantas en presencia del 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 con *O. anthropi*. Este resultado indica efectos a largo plazo de dichas concentraciones de este herbicida 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 presencia del herbicida, incluso en concentraciones moderadas (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 registraron incrementos en el tamaño de la raíz en comparación con *P. aeruginosa* y *O. anthropi*. Estos aumentos no mostraron diferencias en relación con el grupo sin bacterias, lo cual indica 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 concentraciones más altas de GLI sugiere que las bacterias podrían degradar el herbicida, lo que mitigaría sus efectos negativos en el crecimiento de las plantas (Góngora Echevarría et al., 2020).

Conclusiones

Se demostró la toxicidad del glifosato en la biomasa de la raíz, el tallo y la raíz + tallo de *Pisum sativum* (arveja) en suelo franco-arenoso, en presencia de las bacterias *Ochrobactrum anthropi* y *Pseudomonas aeruginosa* de manera 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. Sin embargo, la aplicación del consorcio bacteriano atenuó y revirtió este efecto, favoreciendo el crecimiento de *P. sativum*, con diferencias según la parte de la planta evaluada.

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

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Universidad Científica del Sur, Lima, Perú, a través del concurso de fondos para proyectos de tesis (Resolución Directoral Académica de Carrera n.º 097-2022-DACIA-DAFCA-U. CIENTÍFICA).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener 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 Ponce, & 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>
- 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://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/375>
- 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-Orjuela, 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 Institucional 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://revistas.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), Article 2322. <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 (P₂O₅ and NO₃). *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(7), 2513–2521. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol8/vol8_N7/270-JMES-2713-Cheloufi.pdf

- Dawood, M. G., Abdel-Baky, Y. R., El-Awadi, M. E. S., & Bakhoun, G. S. (2019). Enhancement quality and quantity of faba bean plants grown under sandy soil conditions by nicotinamide and/or humic acid application. *Bulletin of the National Research Centre*, 43, Article 28. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0067-0>
- 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>
- Góngora Echeverría, V. R., García Escalante, R., Rojas Herrera, R., Giacomán Vallejos, G., & Ponce Caballero, C. (2020). Pesticide bioremediation in liquid media using a microbial consortium and bacteria-pure strains isolated from a biomixture used in agricultural areas. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 200, Article 110734. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110734>
- 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>
- 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., Pandebesie, 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 suelo agua. *ALFA*, 2(6), 144–156. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v2i6.46>
- Hébert, M.-P., 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>
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, 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>

- Ledoux, M. L., Hettiarachchy, N., Yu, X., Howard, L., & Sun-Ok, L. (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>
- Lizarbe Alache, L. E., Vega Córdova, E. A., & Lizarbe Córdova, J. A. (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>
- Merani, V. H., Millan, G. J., Ferro, D. A., Larrieu, L., Bennardi, D., Polich, N., Juan, L., & Bongiorno, F. M. (2019). Comparación de metodologías de determinación de la conductividad eléctrica y concentración iónica en suelos de la provincia de Buenos Aires. *Ciencias Agronómicas*, 19, Article e003. <https://doi.org/10.35305/agro34.277>
- Mertens, M., Höss, S., Neumann, G., Afzal, J., & Reichenbecher, W. (2018). Glyphosate, a chelating agent-relevant for ecological risk assessment? *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5298–5317. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1080-1>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para el muestreo de suelos y la guía para la elaboración de planes de descontaminación de suelos* (Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM). <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-n-085-2014-minam/>
- 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*, 14, 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105471>
- 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 Castro, F. E. (2017). *Problemática del uso de glifosato* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional 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>
- Romano-Armada, N., Amoroso, M. J., & Rajal, V. B. (2019). Construction of a combined soil quality indicator to assess the effect of glyphosate application. *Science of the Total Environment*, 682, 639–649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.079>
- Rossi, F., Carles, L., Donnadiou, 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., 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>
- Singh, S., Kumar, V., Sidhu, G. K., Datta, S., Singh Dhanjal, D., Koul, B., Singh Janeja, 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>
- 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. P., Carbone Murgas, R. E., Melo Ríos, A. E., & Merini, L. J. (2020). Efecto del glifosato sobre la 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>
- Villarreal, 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 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>