



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

## Mezcla de oligogalacturónidos para la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados

### Mixture of oligogalacturonides for the phytoextraction of heavy metals in contaminated soils

Omar Cartaya Rubio<sup>1\*</sup>, Ana Ma. Moreno Zamora<sup>1</sup>,  
 Fernando Guridi Izquierdo<sup>2</sup>, Juan Adriano Cabrera Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), km 3 ½, gaveta postal 1, San José de las Lajas 32700, Mayabeque, Cuba

<sup>2</sup>Universidad Agraria de la Habana (UNAH), km 3, gaveta postal 1, San José de las Lajas 32700, Mayabeque, Cuba

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 25/05/2021  
Aceptado: 30/03/2022

#### CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses

#### CORRESPONDENCIA

Omar Cartaya Rubio  
[ocartaya@inca.edu.cu](mailto:ocartaya@inca.edu.cu)



Cu-ID: <https://cu-id.com/2153/cag033222371>

#### RESUMEN

La mezcla de oligogalacturónidos (Ogal) permite la formación de enlaces con metales pesados y modificar la distribución de los cationes metálicos Cu, Cd y Fe en el suelo, así como atenuar los efectos tóxicos en plántulas de tomates, debido a su alta proporción de grupos funcionales ácidos ionizables. Los oligogalacturónidos están constituidos por una cadena lineal de moléculas de ácido galacturónico unidas por enlaces  $\alpha$ -1-4. Se consideran que son bioestimulantes de las plantas. En el presente trabajo se determinó el efecto de una mezcla de Ogal en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), que confirmaron que se les puede usar para cultivar esta y probablemente otras especies en suelos con niveles elevados de esos cationes metálicos. La aplicación de la mezcla de Ogal en diferentes formas y sus combinaciones, modificó la biodisponibilidad de dichos cationes en un suelo contaminado, favoreciendo el proceso de fitoextracción por plantas de tomate. Adicionalmente, se estimuló la producción de biomasa sin que las plantas manifestasen síntomas visuales de fitotoxicidad. Los resultados de este trabajo ofrecen una alternativa para el uso de la mezcla Ogal en otros cultivos hiperacumuladores para fitorremediar suelos contaminados con cationes de metales pesados.

**Palabras clave:** biorremediación, productos naturales, quelatos, tomate

#### ABSTRACT

The mixture of oligogalacturonides (Ogal) allows the formation of bonds with heavy metals and modifies the distribution of Cu, Cd and Fe metal cations in the soil, as well as attenuating the toxic effects on tomato seedlings, due to its high proportion of ionizable acid functional groups. Oligogalacturonides are constituted by a linear chain of galacturonic acid molecules linked by  $\alpha$ -1-4 bonds. They are considered to be plant biostimulants. In the present work, the effect of an Ogal mixture on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants was determined, which confirmed that they can be used to grow this and probably other species in soils with elevated levels of these metal cations. The application of the Ogal mixture in different forms and combinations modified the bioavailability of these cations in a contaminated soil, favoring the phytoextraction process by tomato plants.

Additionally, biomass production was stimulated without the plants showing visual symptoms of phytotoxicity. The results of this work offer an alternative for the use of the Ogal mixture in other hyperaccumulator crops to phytoremediate soils contaminated with heavy metal cations.

**Keywords:** bioremediation, natural products, quelates, tomato

## INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados constituye hoy una de las principales fuentes de detrimento del entorno (Pérez y Betancur, 2016). Esta se debe fundamentalmente a acciones antropogénicas, debido a la extendida industrialización que ha propiciado el vertimiento en suelos agrícolas y aguas, de elevadas cantidades de sustancias residuales que suelen sobrepasar el límite tolerable por los seres vivos, convirtiéndose en tóxicos que forman parte de la cadena trófica natural (Aminiyan *et al.*, 2018).

Durante los últimos años, se han desarrollado tecnologías para eliminar los metales tóxicos, entre la que destaca la biorremediación, tecnología innovadora para el tratamiento de residuos tóxicos (Balderas y Sánchez, 2015). Entre los métodos de la biorremediación se encuentra la fitorremediación, que se basa en el empleo de plantas para depurar ambientes contaminados, dentro de la cual existen dos técnicas, la fitoextracción y la fitoestabilización, que son las más aplicadas (Alonso-Bravo *et al.*, 2018).

En los últimos años se han utilizado, como complemento de la fitorremediación, reguladores del crecimiento vegetal, tales como auxinas y citoquininas, por la capacidad de estas sustancias de incrementar la velocidad de crecimiento y la producción de biomasa en plantas hiperacumuladoras (Navarro *et al.*, 2007). También se han empleado agentes quelantes como el EDTA y ácidos húmicos y fúlvicos (Rubili, 2016), pues es conocido que uno de los mecanismos de tolerancia más importante utilizado por las plantas para reducir la toxicidad por metales pesados, lo constituye la formación de complejos con ligandos orgánicos excretados al suelo a través de la raíz.

Según lo anteriormente planteado, el Laboratorio de Productos Bioactivos del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba (INCA), obtuvo una mezcla de oligogalacturónidos, que presenta una alta proporción de grupos funcionales ionizables con un grado de polimerización (GP), entre 6 y 16, compuesta fundamentalmente por cadenas lineales de ácido galacturónico (Mederos *et al.*, 2020), que pudieran permitir la formación de complejos con los metales pesados. Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de una mezcla de oligogalacturónidos en la biodisponibilidad de cationes metálicos pesados en un suelo contaminado cultivado con una planta hiperacumuladora.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo contaminado para realizar el presente ensayo, se recolectó en áreas de descarga de residuos de la Empresa Cerámica Blanca "Adalberto Vidal" de San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. El suelo experimental se clasificó como ferralítico rojo amarillento lixiviado típico eútrico (Hernández *et al.*, 2015). Como control absoluto se utilizó un suelo del mismo tipo pero sin contaminar, recolectado en el mismo sitio en un lugar alejado de la fuente contaminante. A los suelos, se le determinó la concentración de cationes intercambiables, el pH y el contenido de materia orgánica (MO), según Paneque (2002), y la concentración de metales pseudototales y biodisponibles.

Para la determinación de los contenidos pseudototales de metales pesados, se empleó 0,5 g de las muestras tamizadas; las cuales fueron digeridas con 4 mL de HCl/HNO<sub>3</sub> (3:1) (v:v), para el contenido de metales biodisponibles se agitaron 0,25 g de muestra con EDTA (0,02 mol L<sup>-1</sup>) durante 24 horas y las concentraciones en todos los casos, se determinaron en un espectrofotómetro de absorción atómica, empleando como referencia los BCR 142R y 701 que son suelos certificados para el análisis de metales pesados por esta técnica.

Este experimento se desarrolló en condiciones semi-controladas en bolsas de 7 kg de capacidad y se utilizó como modelo de planta hiperacumuladora, tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Amalia. Los tratamientos realizados fueron:

1. Suelo no contaminado y semillas embebidas en agua
2. Suelo contaminado y semillas embebidas en agua
3. Suelo contaminado y semillas embebidas en Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>)
4. Suelo contaminado, semillas embebidas en agua y Ogal aplicado al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>)
5. Suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar de Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>)
6. Suelo contaminado, semillas embebidas en Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar de Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>)
7. Suelo contaminado, semillas embebidas en agua y Ogal aplicado al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar (20 mg L<sup>-1</sup>)

Se realizaron diez repeticiones por cada tratamiento. Se sembraron tres semillas por maceta y a los 7 días de

emergidas las plantas se dejó solo una en cada maceta, el diseño experimental fue completamente aleatorizado y el riego se realizó aplicando 50 mL de agua cada 2 días.

Se realizaron dos cosechas del material vegetal: a los 35 y 56 días de emergidas las plantas. En cada una de estas ocasiones se evaluó la longitud de la raíz, la altura de las plantas, la masa seca de la parte aérea y de la raíz.

Para determinar el contenido de metales pesados en la raíz y la parte aérea de la planta, se tomaron 0,5 g de muestra seca y molinada con un tamaño de 60 mesh y se adicionaron 4 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado. La digestión se realizó en un horno de microondas (tiempo de 20 min y temperatura máxima de 190 °C). Posteriormente, se trasladaron a recipientes de vidrio y fueron diluidas con 20 mL de agua destilada, fueron filtradas y se procedió a determinar la concentración de cationes metálicos en el sobrenadante mediante absorción atómica (Silva, 2012).

### Fracionamiento de metales en suelo

El fraccionamiento de metales en el suelo se realizó por el método de extracción secuencial, según Rauret *et al.* (2000). Se consideró evaluar las fracciones hidrosoluble, intercambiable, orgánica y residual, empleando como referencia el certificado BCR 701. Esta elección de fracciones se hizo dada la conveniencia de monitorear cambios producidos en el contenido de metales pesados en el suelo a corto plazo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar los resultados correspondientes a los principales parámetros físico-químicos del suelo contaminado y no contaminado que pueden influir en la biodisponibilidad y la distribución de los metales pesados en el suelo, se encontró que el pH del suelo contaminado (5,3) a diferencia del suelo no contaminado (7,2) fue ácido, aspecto importante por la implicación que esto tiene en la movilidad, la biodisponibilidad y absorción de los elementos minerales en los sustratos. En el rango de pH ácido los grupos carboxílicos de la mezcla de Ogal se encuentran disociados, ya que presenta una constante de disociación (pKa) de  $3,84 \pm 0,03$ , según Cartaya *et al.* (2017), y se favorecería el enlace con los metales presentes en el suelo.

El contenido de materia orgánica encontrado en el suelo contaminado fue de 2,03 % lo que puede garantizar una alta biodisponibilidad de los iones metálicos para las plantas, ya que esta presenta una elevada afinidad por ciertos metales (Co, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn), reaccionando con ellos e influyendo en su biodisponibilidad. La biodisponibilidad de los metales está generalmente asociada con la formación de complejos de los metales con las sustancias húmicas y con otros compuestos de elevado peso molecular. Los metales, una vez que forman estos complejos, pueden migrar más fácilmente a las capas profundas o mantenerse en la solución del suelo como complejos orgánicos solubles, que es otro de los componentes del sistema suelo que regula la biodisponibilidad de los metales pesados por enlazarse a los mismos (Reyes *et al.*, 2019).

Los contenidos seudototales encontrados en el suelo contaminado para Cu (786,3 mg kg<sup>-1</sup>), Cd (239,3 mg kg<sup>-1</sup>) y el Fe (3 700,6 mg kg<sup>-1</sup>) respectivamente, son elevados, así como de las formas biodisponibles Cu (527,1 mg kg<sup>-1</sup>), Cd (223,5 mg kg<sup>-1</sup>) y el Fe (2 224,1 mg kg<sup>-1</sup>) respectivamente. En el caso del suelo no contaminado, los contenidos seudototales encontrados para Cu (159,9 mg kg<sup>-1</sup>), Cd (5,5 mg kg<sup>-1</sup>) y el Fe (851,2 mg kg<sup>-1</sup>), así como de las formas biodisponibles Cu (8,8 mg kg<sup>-1</sup>), Cd (0,4 mg kg<sup>-1</sup>) y el Fe (119,3mg kg<sup>-1</sup>) respectivamente son muy similares según los resultados informados por Reyes *et al.* (2019), al evaluar el contenido de metales seudototales y biodisponible para este tipo de suelo.

El análisis del suelo contaminado mediante digestión con agua regia en microondas y la extracción secuencial, mostró la presencia de una cantidad alta de cationes metálicos (Tabla 1), estando los metales estudiados concentrados en un alto porcentaje en las fracciones biodisponibles, las fracciones hidrosolubles y la intercambiable, indicando alta biodisponibilidad para las plantas de estos elementos. Sobresale el caso del Cd (II), ya que el 70 % de su contenido seudototal se corresponde con la fracción hidrosoluble, que es la fracción de mayor acceso para las plantas.

Desde el punto de vista ambiental la fracción biodisponible de los metales pesados, es la que determina el efecto tóxico a corto y mediano plazo, ejercido sobre las poblaciones vegetales y animales presentes en el área y su incorporación a la cadena trófica.

**Tabla 1.** Concentración de metales seudototales y la extracción secuencial de la fase sólida de los metales tóxicos en el suelo contaminado (mg kg<sup>-1</sup>)

Fraciones	Cd	Cu	Fe
Contenido seudototal	239,3±3,7	786,3±2,3	3 700,6±6,1
Hidrosoluble	171,4±4,0	378,3±0,8	1200,4±3,8
Intercambiable	53,3±1,2	269,4±0,1	2129,0±0,6
Enlazada M.O.	2,1±0,1	16,4±0,3	24,3±0,5
Residual	11,8±0,3	121,5±1,0	343,9±0,7

M.O.: materia orgánica

Los contenidos seudototales y biodisponibles de metales pesados obtenidos a los 35 días y al final del experimento (Tabla 2) evidenciaron, de forma general, que los cationes Cu, Cd y Fe disminuyeron sus concentraciones en ambas fracciones, siendo mayor la disminución en los tratamientos donde las plantas fueron sujetas a diferentes formas de aplicación de la mezcla de Ogal, respecto al tratamiento de suelo contaminado sin su aplicación.

De igual forma, se detectó a los 35 días que con la combinación de las formas de empleo de la mezcla Ogal, no se provocó diferencias en comparación con las aplicaciones independientes, a excepción del contenido seudototal de metales para el caso del Cd. Sin embargo, a los 48 días se registraron los contenidos seudototales más bajos de Cu en los tratamientos combinados (T6 y T7). La disminución del contenido de iones metálicos en el suelo se atribuye a que los metales pueden formar complejos estables con la mezcla de Ogal, pasando a formar parte, con el tiempo, de una forma química disponible, y si no es retenido por otra fracción del suelo, puede permanecer en la solución del suelo y ser absorbido por las raíces de las plantas. Otro factor de vital importancia es el pH ácido del suelo, que facilita el intercambio de los protones de los grupos carboxílicos de la mezcla de Ogal, que están completamente

disociados, con los iones metálicos, lo que facilita también la formación de los complejos; de ahí la disminución del contenido de estos elementos en la fracción biodisponible del suelo (Yagual, 2020).

Al analizar la altura de las plantas de tomate al cabo de los 35 primeros días, se observaron diferencias significativas entre las plantas que crecieron en condiciones normales y las establecidas en el suelo contaminado, exceptuando los tratamientos combinados T6 y T7 en los cuales no se presentó afectación en este indicador de crecimiento (Figura 1). De la misma manera, se comprobó que con todas las formas de aplicación de la mezcla de Ogal se superó la altura de las plantas del tratamiento que no la incluía (T2), lo que sugiere que el producto atenúa los efectos fitotóxicos que producen las altas concentraciones de metales encontradas en el suelo.

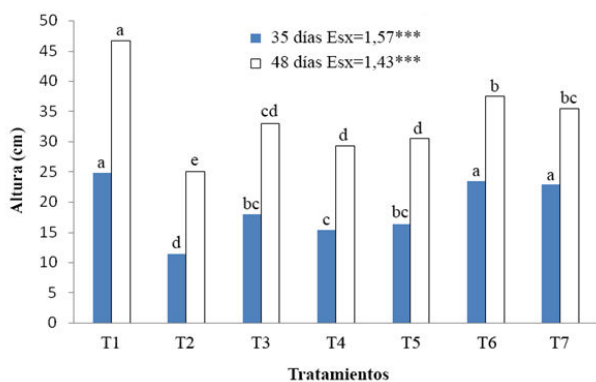
A los 48 días, todos los tratamientos que incluyeron la mezcla de Ogal, provocaron que las plantas alcanzaran alturas superiores, con al menos un 20 % de incremento, con respecto a las del suelo contaminado control (T2), pero inferiores en altura del suelo no contaminado (T1). De manera general, el mayor efecto atenuador de la fitotoxicidad lo indujeron los tratamientos T6 y T7.

**Tabla 2.** Contenido de metales pesados seudototal (T) y biodisponible (Cb) en el suelo expresado en mg kg<sup>-1</sup>, a los 35 y 48 días del experimento. \*Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey para p<0,05

Trat.	35 días						
	Cd		Cu		Fe		
	T	Cb	T	Cb	T	Cb	
T1	5,08 d	0,39 c	157,50 c	7,50 c	839,97 c	118,98 c	
T2	213,86 a	22,38 a	773,53 a	198,62 a	3671,19 a	758,7 a	
T3	211,27 c	21,23 b	755,85 b	187,78 b	3639,48 b	747,78 b	
T4	212,15 b	21,19 b	756,87 b	189,26 b	3628,25 b	739,42 b	
T5	212,18 b	21,15 b	757,09 b	197,45 b	3677,70 b	747,69 b	
T6	210,18 b	21,09 b	754,37 b	176,42 b	3622,59 b	740,24 b	
T7	210,54 c	21,05 b	755,49 b	177,42 b	3624,82 b	738,15 b	
Esx	0,33***	0,36***	3,47***	2,82***	7,92***	3,93***	
Trat.	48 días						
	T1	4,34 f	0,33 d	154,23 d	6,34 d	826,95 c	107,86 c
	T2	212,68 a	22,09 a	760,81 a	169,22 a	3655,50 a	738,38 a
	T3	118,12 c	11,82 c	735,17 bc	162,55 c	3510,58 b	722,71 b
	T4	119,77 b	11,90 c	737,22 bc	161,96 c	3506,18 b	723,20 b
	T5	120,66 b	21,00 b	733,35 bc	164,14 c	3566,29 b	727,14 b
	T6	112,32 d	20,65 b	728,42 c	155,37 b	3506,12 b	725,34 b
	T7	111,05 e	20,46 b	734,32 b	156,05 b	3522,41 b	721,61 b
	Esx	0,39***	0,44***	6,41***	2,90***	4,75***	2,69***

Trat: tratamientos; T: contenido seudototal; Cb: contenido biodisponible; Esx: error estándar

T1: suelo no contaminado y semillas embebidas en agua (control); T2: suelo contaminado y semillas embebidas en agua; T3: suelo contaminado y semillas embebidas con oligogalacturónidos (Ogal; 30 mgL<sup>-1</sup>); T4: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y semillas embebidas con agua; T5: suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T6: suelo contaminado, semillas embebidas con Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T7: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>)



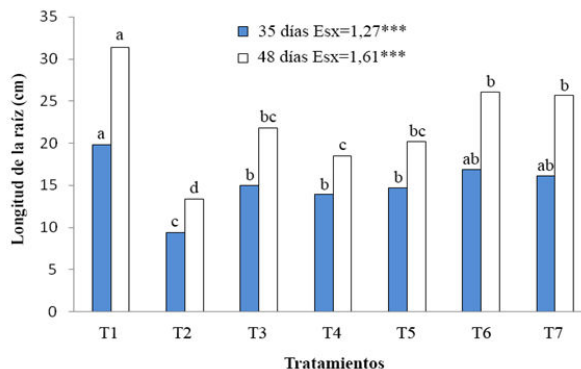
**Figura 1.** Altura de las plantas de tomate cultivadas en un medio contaminado con diferentes formas de aplicación de la mezcla de oligolacturónidos (Ogal), a los 35 y 48 días de germinadas

Esx: error estándar; T1: suelo no contaminado y semillas embebidas en agua (control); T2: suelo contaminado y semillas embebidas en agua; T3: suelo contaminado y semillas embebidas con oligolacturónidos (Ogal; 30 mg L<sup>-1</sup>); T4: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y semillas embebidas con agua; T5: suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T6: suelo contaminado, semillas embebidas con Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T7: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>). \*Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey para p<0,05

Los resultados de la altura de las plantas de tomate cuando se aplicó la mezcla de Ogal pueden estar influidos además por el efecto estimulador del crecimiento que presenta esta mezcla. Este bioproducto influye en la activación de la división celular y en la elongación de las paredes celulares, según lo planteado por Izquierdo *et al.* (2014) y Reyes *et al.* (2021). Se considera que los oligolacturónidos desencadenan procesos fisiológicos de regeneración y división de la pared celular, al estimular la síntesis de sustancias que actúan en esos procesos (Cabrera, 2000). Todo ello origina modificaciones en la arquitectura de las raíces, como demostraron Lara-Acosta *et al.* (2018).

En la figura 2 se muestra la longitud de la raíz de las plantas de tomate en el medio contaminado tratado con varias formas de aplicación de la mezcla de Ogal y en el suelo no contaminado.

Al cabo de los primeros 35 días, no existieron diferencias entre las plantas que crecieron en el suelo no contaminado y las plantas que fueron tratadas con la mezcla de Ogal mediante T6 y T7. Cabe destacar que entre las plantas que crecieron en el medio contaminado con diferentes formas de aplicación de la mezcla de Ogal no mostraron diferencias, pero en general superaron al tratamiento en suelo contaminado sin su aplicación T2.



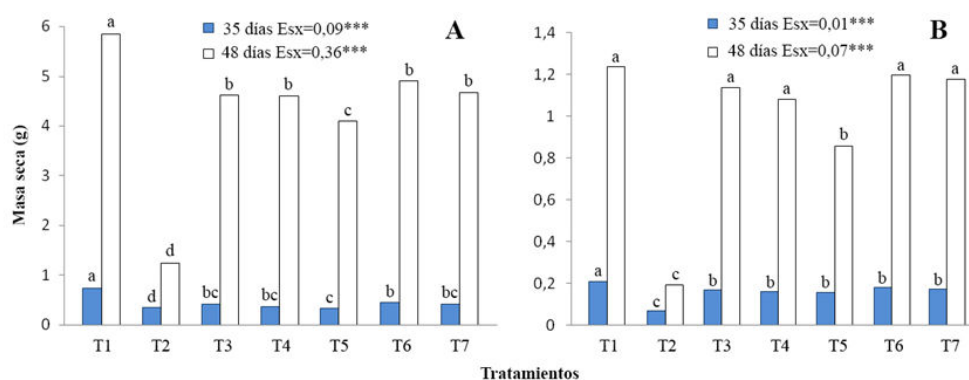
**Figura 2.** Longitud de la raíz de las plantas de tomate cultivadas en un medio contaminado con diferentes formas de aplicación de la mezcla de oligolacturónidos (Ogal), a los 35 y 48 días de germinadas

Esx: error estándar; T1: suelo no contaminado y semillas embebidas en agua (control); T2: suelo contaminado y semillas embebidas en agua; T3: suelo contaminado y semillas embebidas con oligolacturónidos (Ogal; 30 mg L<sup>-1</sup>); T4: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y semillas embebidas con agua; T5: suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T6: suelo contaminado, semillas embebidas con Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T7: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>). \*Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey para p<0,05

A los 48 días después de la siembra las plantas que se desarrollaron en el suelo no contaminado tuvieron la mayor longitud de la raíz. No obstante, al analizar aquellas que crecieron en el suelo contaminado con metales pesados, los mejores resultados se obtuvieron con los tratamientos combinados T6 y T7, aunque todas las variantes de uso de la mezcla de Ogal superaron al tratamiento T2.

En la figura 3 se presentan los resultados de las determinaciones de la masa seca de los diferentes órganos de las plantas de tomate. Al analizar la masa seca de la parte aérea a los 35 días de las plantas que crecieron en el medio contaminado (Figura 3A), se observó que las que estuvieron en contacto con la mezcla de Ogal mostraron resultados superiores a las del tratamiento donde no se aplicó Ogal (T2), pero inferiores a las del medio no contaminado. A los 48 días, todos los tratamientos en el suelo contaminado que contenían Ogal provocaron que las plantas triplicaran o más, la masa seca foliar en comparación con T2, aunque en ningún caso se iguala a la de las plantas en el suelo no contaminado.

En la figura 3B se observa que a los 35 días en todos los tratamientos en el suelo contaminado en los que se incluyó la mezcla de Ogal, se estimuló la producción de biomasa radical, aunque no se igualó a la masa seca de las raíces de las plantas desarrolladas en el suelo no contaminado. A los



**Figura 3.** Masa seca de plántulas de tomate cultivadas en un medio contaminado con diferentes formas de aplicación de la mezcla de Oligogalacturónidos (Ogal) a los 35 y 48 días de germinadas. A) parte aérea; B) raíz

Esx: error estándar; T1: suelo no contaminado y semillas embebidas en agua (control); T2: suelo contaminado y semillas embebidas en agua; T3: suelo contaminado y semillas embebidas con oligogalacturónidos (Ogal; 30 mgL<sup>-1</sup>); T4: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y semillas embebidas con agua; T5: suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T6: suelo contaminado, semillas embebidas con Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T7: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>).

\*Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey para  $p < 0,05$

48 días no se observaron diferencias en la masa seca de la raíz entre las plantas que crecieron en el suelo no contaminado y aquellas en las que se aplicó el producto en diferentes formas, a excepción del tratamiento de Ogal aplicado folialmente (T5). Es de destacar que incluso para este último tratamiento, la masa seca de las raíces superó en más de cuatro veces a la que se encontró para el caso de la no inclusión de la mezcla de Ogal (T2).

La evolución en el tiempo de la masa de la raíz, sugiere que después de la etapa inicial de adaptación, la utilización de mezcla de Ogal permite que las plantas de tomate tengan un adecuado desarrollo. Esto último puede atribuirse a que se haya facilitado la disponibilidad y la absorción de los nutrientes, como consecuencia de la estimulación del crecimiento radical por el Ogal.

Prieto *et al.* (2009) han planteado que una concentración elevada de metales para las plantas puede producir un efecto severo en el crecimiento radical y como consecuencia, provocar daño en la raíz, la reducción de las masas fresca y seca de la planta; así como también la reducción en la absorción de agua y nutrientes. Estos efectos se apreciaron de manera atenuada al utilizar en este trabajo, estimuladores del crecimiento, como lo es la mezcla de Ogal.

Al evaluar las concentraciones de los iones metálicos estudiados tanto en la parte aérea como en la radical a los 35 y 48 días (Tablas 3 y 4), se verificó que a los 35 días la aplicación de la mezcla de Ogal, prácticamente en todas las formas de utilización, produjo un incremento en la concentración de los tres iones en ambas partes, sobresaliendo los tratamientos combinados (T6 y T7). Además, se corroboró además que en la raíz se produjo la mayor acumulación, que fue menos marcada para el hierro.

A los 48 días después de la siembra, también se manifestó el efecto estimulador de la aplicación de la mezcla de Ogal y se comprobó que, las hojas resultaron el órgano de mayor acumulación en la parte aérea. En general, se detectó que los tratamientos T6 y T7 indujeron las mayores acumulaciones de los iones estudiados.

La acumulación de metales tóxicos en los diferentes órganos de las plantas de tomate se presentó en el siguiente orden: raíz > hojas > tallo. Esto se ha observado en otros trabajos, resultados que se atribuye a que algunas especies basan su resistencia a los metales en la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte hacia la parte aérea.

De acuerdo a los resultados obtenidos el elemento que se acumuló en mayor cantidad en las raíces, con respecto al contenido total en suelo, fue el Cu. Las mayores concentraciones de metal determinadas en este trabajo, implican una relación entre el sustrato en que crece la planta y la cantidad de metal absorbida por las plantas de tomate.

La aplicación de la mezcla de Ogal al suelo favoreció la formación de complejos estables entre los componentes de la mezcla de Ogal y los cationes metálicos, como se verificó en los experimentos anteriores. Esto regula la disponibilidad de los cationes y su absorción por las plantas, lo cual coincide con lo planteado por Begun *et al.* (2012) que confirman el aumento de la absorción de los metales pesados por las raíces de las plantas por la formación de complejos metálicos solubles. Además, el aumento del contenido de elementos metálicos en la parte aérea al realizar las aspersiones foliares fue informado por Castaldi *et al.* (2010) al estudiar el papel de las sustancias pécticas en la acumulación de metales.

**Tabla 3.** Concentración de metales pesados (mg kg<sup>-1</sup> masa seca) en raíz y parte aérea de las plantas de tomate a los 35 días de desarrollo. \*Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey para p<0,05

Trat.	Cd		Cu		Fe	
	Raíz	P. Aérea	Raíz	P. Aérea	Raíz	P. Aérea
T1	0,89 e	0,38 d	0,98 f	0,50 e	3,78 d	1,59 c
T2	22,30 d	12,43 c	25,26 d	11,37 d	51,90 c	39,98 b
T3	28,52 b	14,36 b	28,17 bc	16,90 b	52,24 bc	42,32 a
T4	30,58 a	13,43 bc	28,69 b	17,14 b	52,68 abc	42,59 a
T5	26,50 c	16,25 a	27,12 c	13,21 c	53,33 ab	40,79 b
T6	31,06 a	16,82 a	32,68 a	19,75 a	53,58 a	43,42 a
T7	30,56 a	16,79 a	32,24 a	18,65 a	53,46 ab	43,20 a
Esx	0,38***	0,38***	0,39***	0,38***	0,37***	0,32***

Trat: tratamientos; T: contenidoseudototal; Cb: contenido biodisponible; Esx: error estándar

T1: suelo no contaminado y semillas embebidas en agua (control); T2: suelo contaminado y semillas embebidas en agua; T3: suelo contaminado y semillas embebidas con oligogalacturónidos (Ogal; 30 mg L<sup>-1</sup>); T4: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y semillas embebidas con agua; T5: suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T6: suelo contaminado, semillas embebidas con Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T7: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>)

**Tabla 4.** Concentración de metales pesados (mg kg<sup>-1</sup> masa seca) en raíz, tallo y hojas de las plantas de tomate a los 48 días de desarrollo. \*Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey para p<0,05

Trat.	Cd			Cu			Fe		
	Raíz	Tallo	Hojas	Raíz	Tallo	Hojas	Raíz	Tallo	Hojas
T1	2,89 g	0,45 e	1,39 g	1,62 d	0,47 g	0,82 g	4,67 g	1,38 g	6,65 f
T2	26,21 f	3,57 d	19,75 f	31,74 c	8,16 f	22,34 f	42,68 f	14,88 f	34,69 e
T3	31,65 e	6,94 ab	22,05 e	43,99 bc	13,14 c	33,70 d	63,19 e	23,14 b	47,54 d
T4	39,61 d	6,04 c	23,04 d	50,51 b	10,75 e	31,44 e	64,09 d	20,75 e	45,72 c
T5	40,48 c	6,36 bc	24,33 c	47,70 b	12,51 d	34,11 c	67,59 c	22,51 d	48,89 b
T6	43,70 b	7,13 ab	24,45 b	48,90 b	15,71 a	37,40 b	72,74 b	23,01 c	49,61 ab
T7	44,40 a	7,24 a	26,70 a	58,94 a	13,46 b	41,73 a	73,24 a	23,81 a	52,03 a
Esx	0,05***	0,24***	0,01***	4,05***	0,03***	0,03***	0,03***	0,01***	0,54***

Trat: tratamientos; T: contenidoseudototal; Cb: contenido biodisponible; Esx: error estándar

T1: suelo no contaminado y semillas embebidas en agua (control); T2: suelo contaminado y semillas embebidas en agua; T3: suelo contaminado y semillas embebidas con oligogalacturónidos (Ogal; 30 mg L<sup>-1</sup>); T4: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y semillas embebidas con agua; T5: suelo contaminado, semillas embebidas en agua y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T6: suelo contaminado, semillas embebidas con Ogal (30 mg L<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>); T7: suelo contaminado y aplicación de Ogal al suelo (30 mg kg<sup>-1</sup>) y aspersión foliar con Ogal (20 mg L<sup>-1</sup>)

Kabata-Pendias (2000) describió que la captación de metales pesados por las raíces puede ser un proceso tanto pasivo (no metabólico) como activo (metabólico) y estos mecanismos de captación difieren dependiendo del metal. Ejemplo de ello son el Pb y el Ni que son absorbidos pasivamente mientras que el Cu, Mo y Zn son absorbidos activamente. Esta diferencia podría asociarse al comportamiento observado en las raíces de tomate. Además, Rodríguez *et al.* (2002), demostraron que, en la parte aérea del tomate, el Cu y el Fe presentan una baja respuesta a las concentraciones en el suelo, porque tienen una movilidad relativamente baja respecto a otros elementos en las plantas, permaneciendo en los tejidos de las raíces y

hojas hasta su senescencia y sólo experimentando aumento en suelos muy contaminados; mientras que el Cd se incrementa con contenidos relativamente menores en el sustrato.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las plantas de tomate cultivadas en un medio natural contaminado, demuestran los efectos beneficiosos que le confiere las diferentes formas de aplicación de la mezcla de Ogal a plantas hiperacumuladoras como el tomate, de ahí la posibilidad de utilizar este producto con vistas a la biorremediación, a

partir de la fitoextracción, pues aumentan el contenido de la biomasa de las plantas, con lo cual además, se disminuye la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Omar Cartaya Rubio:** Planificación, elaboración de la investigación, análisis e interpretación de los resultados.

**Ana Ma. Moreno Zamora:** Elaboración de la investigación, análisis e interpretación de los resultados.

**Fernando Guridi Izquierdo:** Planificación de la investigación, análisis e interpretación de los resultados.

**Adriano Cabrera Hernández:** Planificación de la investigación, análisis e interpretación de los resultados.

## BIBLIOGRAFIA

- ALONSO-BRAVO, J. N., MONTAÑO-ARIAS, N. M., SANTOYO-PIZANO, G., *et al.* 2018. Biorecuperación y fitorremediación de suelo impactado por aceite residual automotriz. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9 (1): 45-51.
- AMINIYAN, M. M., BAALOUSHA, M., MOUSAVI, R., *et al.* 2018. The ecological risk, source identification, and pollution assessment of heavy metals in road dust: a case study in Rafsanjan, SE Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (14): 13382-13395.
- BALDERAS, L. and SÁNCHEZ, Y. 2015. Biorremediation of soil polluted by 75000 ppm of waste motor oil applying biostimulation and phytoremediation with *Sorghum vulgare* and *Bacillus cereus* or *Burkholderia cepacia*. *Journal Selva Andina Research Society*, 6 (1): 23-32.
- BEGUN, Z., RAHMAN, I., TATE, Y., *et al.* 2012. Remediation of toxic metal contaminated soil by washing with biodegradable aminopolycarboxylate chelants. *Chemosphere*, 87: 1161-1170.
- CABRERA, J. C. 2000. Obtención de una mezcla de (1-4) a-D oligogalacturónidos bioactivos a partir de un grupo de subproductos de la industria cítrica. Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de las Lajas, Cuba, 100 p.
- CARTAYA, O., MORENO, A., GURIDI, F., *et al.* 2017. Estudio de los complejos oligogalacturónidos-Cu(II) en solución y fase sólida. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 18 (1): 38-46.
- CASTALDI, P., LAURO, G., SENETTE, C., *et al.* 2010. Role of the Ca-pectates on the accumulation of heavy metals in the root apoplasm. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48 (12): 1008-1014.
- HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PÉREZ-JIMÉNEZ, J. M., BOSCHINFANTE, D., *et al.* 2015. *Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*. Instituto de Suelos, La Habana, Cuba, 64 p.
- IZQUIERDO, H., GONZÁLEZ, M. C. y NÚÑEZ, M. C. 2014. Estabilidad genética de las plantas de banano (*Musa* spp.) micropropagadas con reguladores del crecimiento no tradicionales. *Biotecnología Aplicada*, 31 (1): 18-22.
- KABATA-PENDIAS, A. 2000. *Trace elements in soils and plants*. Tercera Edición. CRC Press, Boca Ratón, Estados Unidos de América, 403 p.
- LARA-ACOSTA, D., COSTALES-MENENDEZ, D. y FALCÓN-RODRIGUEZ, A. 2018. Los oligogalacturónidos en el crecimiento y desarrollo de las plantas. *Cultivos Tropicales*, 39 (2): 127-134.
- MEDEROS, Y., HORMAZA, J., REYNALDO, I., *et al.* 2020. Caracterización de mezclas de oligogalacturónidos Bioactivos. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 42 (2-3): 1-5.
- NAVARRO, J. P., AQUILAR, I. A. y LÓPEZ-MOYA, J. R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16 (2): 1-17.
- PANEQUE, M. 2002. *Manual de técnicas analíticas para el análisis de suelos, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos*. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, Cuba, 130 p.
- PÉREZ, M. M. and BETANCUR, A. 2016. The impact of mining on the natural environment and current situation of Colombia. *Sociedad y Ambiente*, 10: 95-112.
- PRIETO, J., GONZÁLEZ, C., ROMÁN, A. y PRIETO, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1): 29-44.
- RAURET, G., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J. F., SAHUQUILLO, A., *et al.* 2000. Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in sewage sludge

- amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content. *Journal of Environmental Monitoring*, 2: 228-233.
- REYES-PÉREZ, J. J., RAMOS-REMACHE, R. A., LLERENA-RAMOS, L. T., *et al.* 2021. Potencialidades de oligolacturónidos y quitosacáridos en el enraizamiento de las plantas. *Terra Latinoamericana*, 39: 1-9.
- REYES-RODRÍGUEZ, R., GURIDI-IZQUIERDO, F., VALDÉS-CARMENATE, R., *et al.* 2019. Propiedades biológicas, ácidos húmicos y metales pesados biodisponibles en suelo Ferralítico bajo diferentes usos agrícolas. *Revista Cultivos Tropicales*, 40 (3): 2-7.
- RODRÍGUEZ, P. H., GINCCHIO, R., BADILLA OHLBAUM, R., *et al.* 2002. Effect of soil copper content and pH on copper uptake of selected vegetables grown under controlled conditions. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21: 1736-1744.
- RUBILI, H. 2016. Uso de Ácidos Fúlvicos y Girasol Ornamental en la Remediación de un Calcisol Contaminado con Plomo. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrícola y Ambiental. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, 76 p.
- SILVA, P. 2012. Digestión en horno de microondas para determinación de contenido de hierro y zinc totales en alimentos. *Tecnología en Marcha*, 25 (3): 96-100.
- YAGUAL-BARZOLA, K. R. 2020. Técnicas de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos aplicables en el cantón Salinas. La Libertad. UPSE, Matriz. Tesis para optar al título de Ingeniería en Petróleo. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península Santa Elena, La libertad, Ecuador, 97 p.



Artículo de libre acceso bajo los términos de una [Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](#). Se permite, sin restricciones, el uso, distribución, traducción y reproducción del documento, siempre que la obra sea debidamente citada.