



Evaluation of the effects of plant growth promoting bacteria on the absorption of potentially toxic elements in *Opuntia ficus-indica* crops irrigated with wastewater

Evaluación de los efectos de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la absorción de elementos potencialmente tóxicos en cultivos de *Opuntia ficus-indica* regados con aguas residuales

Victoria Téllez-Pérez¹, Ignacio Ocampo-Fletes¹, Mario Alberto Tornero-Campante¹, Pedro Antonio López¹, Luis Alberto Villarreal-Manzo¹, José Carlos Mendoza-Hernández^{2*}

¹Colegio de Postgraduados- Campus Puebla, Boulevard Forjadores de Puebla 205, Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, 72760, Puebla, Mexico.

²Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur, 72570, Puebla, Mexico.

*Corresponding author

E-mail address: josecarlos.mendoza@correo.buap.mx (J. C. Mendoza-Hernández)

Article history:

Received: 29 April 2026 / Received in revised form: 30 July 2026 / Accepted: 26 September 2026 / Published online: 2 October 2026.

<https://doi.org/10.29267/mxjb.2026.11.4.1-20>

ABSTRACT

Agricultural irrigation with wastewater has increased. In Mexico, about half of the wastewater is untreated and is discharged into bodies of water, soils and irrigation canals, the latter disposal site being the one that supplies six per cent of agricultural producers. The objective was to evaluate the quality of the plant material of the vegetable cactus *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco with and without plant growth promoting bacteria, in plots irrigated with untreated wastewater from the Atoyac River, which contain potentially toxic elements in locations in the municipalities of Atlixco and Santa Isabel Cholula. The analysis of the potentially toxic elements in the plant material indicates that with the inoculation of *Serratia*

K120, the concentration of Pb in the aerial part of the cactus decreased (5.76 ± 2.42 ppm) compared to the plants inoculated with *Escherichia coli* N16 (18.50 ± 2.42 ppm). Tukey ($p \leq 0.05$). The results show that *O. ficus-indica* cultivar Atlixco inoculated with plant growth promoting bacteria is capable of phytostabilizing Pb by decreasing its bioavailability and mobility, which benefits human health and the environment.

Keywords: irrigation with residual water, nopal vegetable, plant growth promoting bacteria.

RESUMEN

El riego agrícola con aguas residuales se ha incrementado. En México, cerca de la mitad de las aguas residuales no son tratadas y se vierten a cuerpos de agua, suelos y canales de riego, siendo este último sitio de disposición el que abastece al seis por ciento de los productores agrícolas. El objetivo consistió en evaluar el grosor de cladodio y la concentración de Zn y Pb de cultivos de nopal verdura *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin bacterias promotoras de crecimiento vegetal, en parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, que contienen elementos potencialmente tóxicos en localidades de los municipios de Atlixco y Santa Isabel Cholula. El análisis de los elementos potencialmente tóxicos en el material vegetal indica que con la inoculación de *Serratia* K120 disminuyó la concentración de Pb en la parte aérea del nopal (5.76 ± 2.42 ppm) en comparación con las plantas inoculadas con *Escherichia coli* N16 (18.50 ± 2.42 ppm) Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados muestran que *O. ficus-indica* cultivar Atlixco inoculada con bacterias promotoras de crecimiento vegetal es capaz de fitoestabilizar Pb al disminuir su biodisponibilidad y movilidad, lo que beneficia a la salud humana y al medio ambiente.

Palabras clave: bacterias promotoras de crecimiento vegetal, nopal verdura, riego con agua residual.

1. Introducción

En América Latina, la inversión nacional y extranjera destinada al desarrollo industrial ha inducido el crecimiento económico, así como el desarrollo y la implementación de tecnología limpia. Sin embargo, en otros sectores, también ha provocado el traslado de la contaminación de países inversionistas a países como México. Esto ha generado un “paraíso para la contaminación”, facilitado por la débil regulación ambiental (Freire-Vinueza *et al.*, 2021), que si bien, cuenta con el soporte de un marco normativo (Secretaría de Economía, 2016; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002), carece de sistemas integrales de gestión ambiental que evalúen, monitoreen e integren las políticas, procedimientos y prácticas.

En la República Mexicana, el 54 % de las aguas residuales no son tratadas y se vierten en cuerpos de agua, suelos y canales de riego (Robledo-Zacarías *et al.*, 2017). Según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA, 2019), en México, 6.6 % de los productores afirmaron que usan agua negra (residual) para la agricultura.

Las afectaciones agrícolas por el agua contaminada no se limitan a las localidades, sino a su cercanía a cuerpos de agua contaminados. Mientras estos no se encuentren en proceso de tratamiento, transportan sustancias nocivas vertidas en sus cauces que se depositan en los suelos, donde se produce una interacción dinámica con el agroecosistema. Entre las sustancias nocivas vertidas en los cuerpos de agua de la región atlixquense se encuentran los Elementos Potencialmente Tóxicos o EPT (Mendoza-Retana *et al.*, 2021; Morales-García *et al.*, 2017; Téllez *et al.*, 2023): As, Cd, Cr, Hg, Ni o Pb, cuya toxicidad depende de su movilidad en el medio, determinada por su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación (Sánchez-Corona *et al.*, 2025). Los EPT, a diferencia de los contaminantes orgánicos, no se degradan, antes bien, se bioacumulan en la cadena trófica, cuerpos hídricos y suelos, generando problemas en la salud de productores y consumidores.

La cuenca hidrológica del río Alto Atoyac (18A) abarca 4 001.66 km², se constituye por los ríos Alseseca y Atoyac y recibe a las aguas residuales domésticas e industriales de la región, por tal condición, afecta tanto a Texmelucan, donde se unen ambos ríos, como a los municipios Tepetitla, Nativitas, Tetlatlahuca, Zacatelco, Xicohtzinco y Papalotla en el estado de Tlaxcala y a diversos municipios del estado de Puebla. Adicionalmente, afecta a Ixtacuixtla y Santa Apolonia Teacalco a través del DR056 mediante canales de riego. Los ríos desembocan en la presa Valsequillo y una parte de su caudal se deriva hacia Atlixco a través de un túnel, a fin de aprovechar su energía cinética para producir electricidad (INEGI, 2019; Morales, 2012).

En el Valle de Atlixco, estas aguas, a pesar de que mantienen una calidad comprometida por la presencia de diversos EPT, abastecen e irrigan cultivos de hortalizas como epazote (*Dysphania ambrosioides*), alfalfa (*Medicago sativa*), la hierba buena (*Mentha spicata*), huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.), cilantro (*Coriandrum sativum*), cebolla (*Allium cepa*), maíz (*Zea mays*) y nopal verdura (*O. ficus-indica*), así como diversas especies de plantas ornamentales (flores) de interés comercial (Téllez *et al.*, 2023), generando riesgos sanitarios para los consumidores. No obstante, aunque el nopal verdura que se corta para ser consumido, no se encuentra en contacto directo con el agua de riego, su cultivo se plantea como una oportunidad con ventajas sanitarias sobre especies de porte más bajo.

El 53.8 % de los ingresos por el cultivo de nopal bajo condiciones de riego y a cielo abierto en agroecosistemas de todo el estado de Puebla, provinieron de los municipios de Atlixco y Santa Isabel Cholula durante el año 2021 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2022). Cultivos de importancia económica como el nopal, además, podrían usarse en un contexto de contaminación de las aguas de riego y se podría hacer uso de Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), con el fin de disminuir la absorción de los EPT provenientes de aguas residuales hacia la planta y promover la fitoestabilización (Mendoza-Hernández *et al.*, 2017; Carrillo-González *et al.*, 2017).

Las BPCV estimulan la biomasa, el área foliar, así como la absorción de nutrientes por las plantas. De igual forma, producen compuestos bioestimulantes, además de tolerar o degradar sustancias tóxicas, favoreciendo un desarrollo sostenido y con menor uso de

agroquímicos (Duclas *et al.*, 2026; Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2025; Ortiz-Pérez *et al.*, 2019).

Así, el objetivo de la investigación fue evaluar la calidad del material vegetal de *O. ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin BPCV, en parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, en comunidades de los municipios de Santa Isabel Cholula y Atlixco, Puebla.

2. Materiales y métodos

2.1. Cultivo de bacterias promotoras de crecimiento vegetal

Las cepas bacterianas *Serratia* K120, *Serratia* MC119, *Enterobacter* K131, *E. coli* N16 y *Enterobacter* N9 fueron aisladas de la rizósfera de plantas endémicas situadas en un jale minero de Zimapán, Hidalgo, México, cuyos géneros fueron previamente caracterizados como BPCV por su capacidad de producir actividad enzimática de ACC desaminasa, ácido indol 3 acético, solubilización de fosfatos y síntesis de sideróforos (Mendoza *et al.*, 2016). Las cepas bacterianas se reprodujeron en caldo Luria Bertani (LB) a 30°C, durante 48 h a 80 rpm. Se centrifugaron a 8 000 rpm y resuspendieron en buffer de fosfatos 0.1 M a pH 7.4 para obtener una absorbancia de 0.5, que corresponde aproximadamente a 1×10^9 UFC/mL.

2.2. Diseño experimental y cultivo de nopal

Los experimentos de inoculación de cepas de BPCV en *O. ficus-indica* cultivar Atlixco se realizaron en dos parcelas, ubicadas geográficamente mediante las coordenadas 18° 55' 18.116" N, 98° 21' 49.316" O y 1 868.4 msnm (Parcela 1 "Estacas") y a 18° 55' 28.909" N, 98° 21' 49.936" O y 1878.4 msnm (Parcela 2 "Terciopelo"), respectivamente (Fig. 1).

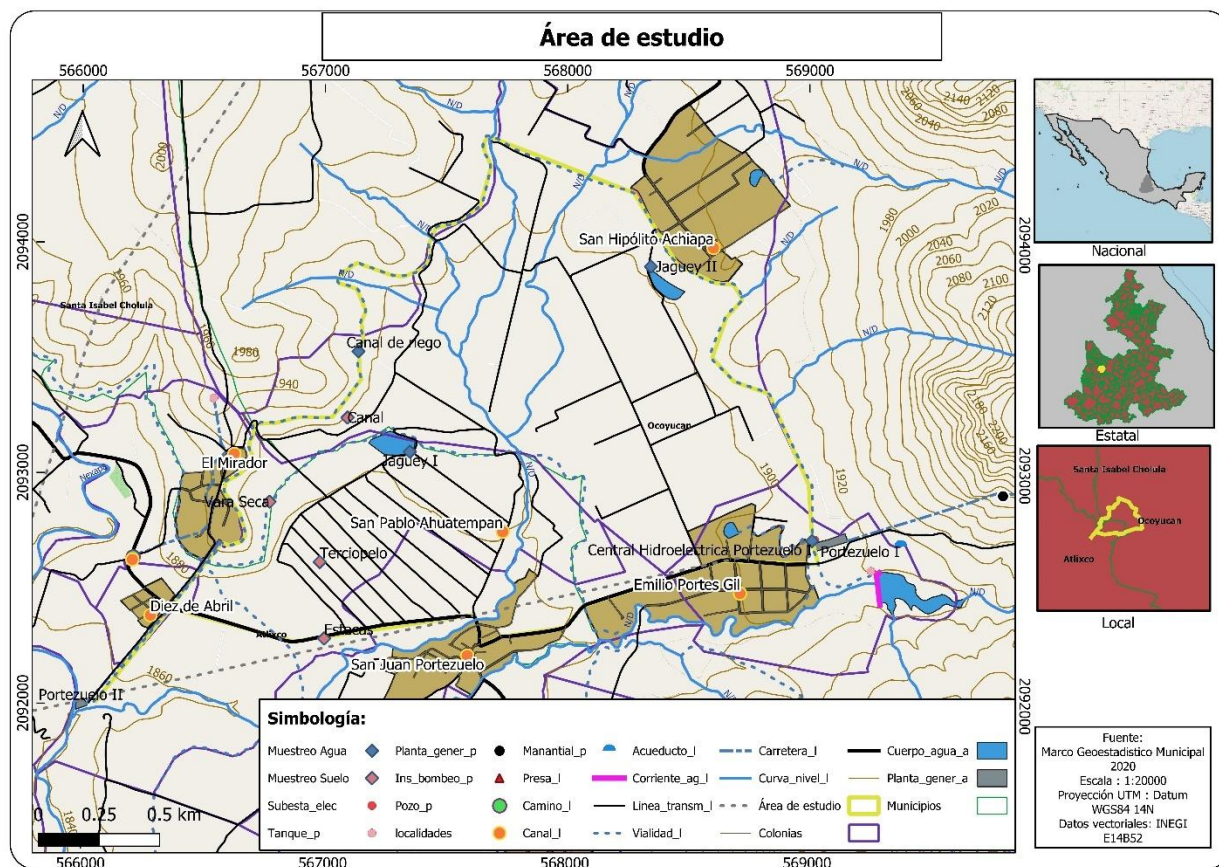


Fig. 1. Localización de la zona de estudio en el valle de Atlixco, Puebla. Fuente: Elaboración propia con información de campo y datos vectoriales INEGI E14B52 (INEGI, 2022).

Fig. 1. Location of the study area in the Atlixco Valley, Puebla. Source: Authors' elaboration with field information and vector data INEGI E14B52 (INEGI, 2022).

Se establecieron dos diseños experimentales de bloques completos al azar y aplicación de seis tratamientos (T1: *Serratia* K120, T2: *Serratia* MC119, T3: *Enterobacter* K131, T4: *E. coli* N16, T5: *Enterobacter* N9 y T6: control sin inocular cepa) con cinco réplicas, empleando como planta indicadora al nopal (*O. ficus-indica*) cultivar Atlixco. Cada unidad experimental se constituyó con 12 plantas (2.7 m²), donde sólo dos conformaron la parcela útil. Cada una de las dos parcelas tuvo 30 unidades experimentales, por lo que se necesitaron por cada parcela 81 m² y 360 plantas de *O. ficus-indica* cultivar Atlixco.

Se realizaron tres aplicaciones mensuales de los tratamientos en los meses de septiembre, octubre y noviembre, colocándose al pie de cada cladodio 50 mL de la suspensión de cada cepa bacteriana y al control solo se le aplicó buffer de fosfatos 0.1 M pH 7.4.

2.3. Muestreo del material vegetal

Se llevaron a cabo dos mediciones del grosor (mm) de cada cladodio de las plantas de la parcela útil, desde la base de cada cladodio o raqueta, con un vernier digital Truper, modelo 14388. La segunda medición se realizó un mes después de la primera, antes de que finalizara el invierno. Enseguida, un día después de finalizar la segunda medición, los nopales se cosecharon durante el transcurso de la mañana haciendo sólo un corte en la base de los nopales.

Las muestras se transportaron en rejillas plásticas al laboratorio para su secado en una estufa Riossa® con aire forzado durante 48 h a 70 °C. Se pulverizaron 150 g por muestra en mortero de porcelana y se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica las concentraciones de los elementos Zn y Pb, en las muestras que previamente habían pasado por el proceso de digestión conforme al método EPA 3052 (Environmental Protection Agency, 1996).

2.4. Datos del material vegetal

Los datos experimentales para cada cepa se presentan por quintuplicado en términos de la media y el error estándar de grosor de raquetas, así como concentración de Zn y Pb en raquetas cosechables como nopal verdura por planta.

2.5. Muestreo y análisis de plomo y zinc en agua de riego

Se realizó un muestreo de agua de tipo puntual en el canal de riego en época de lluvia, ubicado en las coordenadas 18° 55' 58.6" N, 98° 21' 44.5" O y 1 909 msnm. Se realizó a una profundidad media de 30 cm en el centro de la corriente, evitando la capa superficial y los sedimentos del fondo. Se usó una botella de polietileno de 1 L previamente enjuagada tres veces con el agua del canal. La muestra se etiquetó y refrigeró a 4°C y fue transportada al laboratorio en menos de 24 h. La muestra se analizó conforme a la norma NMX-AA-051-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016) para determinar las concentraciones de Pb y Zn.

2.6. Muestreo y análisis de plomo y zinc en suelo

Se realizó un muestreo y análisis conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002). El muestreo se hizo de acuerdo con el procedimiento AS-01 sobre la obtención y preparación de muestra. Se dividió el terreno en áreas homogéneas, se recorrió en zigzag y se tomaron 15 submuestras con pala a una profundidad de 0 a 30 cm sin materiales orgánicos, piedras ni raíces, las cuales se mezclaron en una cubeta de plástico limpia.

Se extrajo una muestra compuesta de 1 kg mediante el método de cuarteos diagonales. La muestra se vació en una bolsa limpia de polietileno, se etiquetó y se preservó en el laboratorio. El análisis se hizo con base en el procedimiento AS-14 sobre el contenido de metales contaminantes (Pb) y de micronutrientes disponibles (Zn).

2.7. Cálculo de la transferencia, translocación y bioacumulación

Se evaluó la transferencia de los metales Zn y Pb del suelo a las partes aérea y radical de *O. ficus-indica* cultivar Atlixco mediante los factores de transferencia, translocación y bioacumulación. Se define a la concentración del metal en la parte aérea (C_A) respecto a la concentración de del mismo metal en el suelo (C_S) como el factor de transferencia en la parte aérea (FT_A).

$$\text{Factor de transferencia en la parte aérea } FT_A = C_A/C_S \quad (1)$$

Por su parte, se define a la concentración del metal en la raíz (C_R) con respecto a la concentración del mismo metal en el suelo (C_S) como el factor de transferencia en la raíz (FT_R).

$$\text{Factor de transferencia en la raíz } FT_R = C_R/C_S \quad (2)$$

Asimismo, se determina a C_A con respecto a C_R como el factor de translocación (FT).

$$\text{Factor de translocación } FT = C_A/C_R \quad (3)$$

Mientras que se establece la suma de C_A más C_R con respecto a C_S como el factor de bioacumulación (FB).

$$\text{Factor de bioacumulación } FB = (C_A + C_R)/C_S \quad (4)$$

2.8. Análisis estadístico

La evaluación estadística de dichas variables se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El análisis estadístico permite comparar las medias y determinar si las diferencias son significativas debido al efecto de las cepas. El análisis estadístico se realizó con el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2014).

3. Resultados

3.1. Efecto de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en el desarrollo del nopal

Al evaluar las características de crecimiento de *O. ficus-indica*, cultivar Atlixco con y sin BPCV, en suelo irrigado con aguas residuales no tratadas, en dos parcelas de un sistema agrícola en el Valle de Atlixco, se encontró un efecto en el desarrollo vegetal, según el tipo de cepa bacteriana inoculada. Para conocer el efecto de las BPCV en el desarrollo del nopal, se evaluó la variable respuesta grosor de raquetas (mm), mediante un análisis estadístico de los valores obtenidos con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), los cuales se reflejan en la tabla 1. Así, la variable de respuesta de grosor de cladodio madre (GM) mostró lo siguiente respecto a cada cepa.

La inoculación de *Serratia* K120 en las raíces de nopal produjo un GM con valores superiores a los presentados en el grupo control en las dos parcelas y mediciones. Se encontró que en la Parcela 2 alcanzó 36.85 ± 2.60 mm al concluir el estudio, aunque no presentó diferencias estadísticamente significativas con respecto al testigo, lo cual se identifica en la tabla 1 con la letra “a”.

Por su parte, *Serratia* MC119 no presentó un comportamiento igual de consistente ya que, mientras en la Parcela 1 se sostuvieron rangos similares al control, en la primera medición de la Parcela 2 se identificó una disminución significativa (b) con un grosor de 25.18 ± 2.12 mm, el menor valor de toda la tabla 1.

Asimismo, en la Parcela 1, los valores de GM obtenidos al inocular el nopal con la cepa *Enterobacter* K131 fueron estadísticamente menores (31.69 mm y 32.03 mm) a los conseguidos con la inoculación de la cepa *Enterobacter* N9; sin embargo, en la Parcela 2 se mostró un grosor mayor de 37.08 ± 2.12 mm en la primera medición, superando el testigo.

A su vez, en la primera medición de la Parcela 1, en el grupo inoculado con *E. coli* N16, se obtuvieron los registros de crecimiento más bajos con 30.30 ± 1.85 mm, una diferencia estadísticamente menor con respecto al resto de los tratamientos.

Sin embargo, en cuanto al rendimiento de la cepa *Enterobacter* N9 al ser inoculada en la Parcela 1 se alcanzaron los valores máximos del estudio, con una media de 40.72 ± 1.85 mm en la primera medición y 42.02 ± 2.38 mm en la segunda, lo cual contrasta con los resultados obtenidos en el grupo control de plantas sin inocular, las cuales presentaron un comportamiento más limitado y estable. Mientras que en la Parcela 1, el grosor se mantuvo entre 33.10 ± 1.86 mm y 34.69 ± 2.39 mm, en la Parcela 2 el grosor fue ligeramente inferior con 31.51 ± 4.51 mm al final de la medición.

De esta manera, el análisis de la variable GM mostró que la cepa *E. coli* N16 fue menor que el control, sin embargo, las cepas *Serratia* K120, *Serratia* MC119 y *Enterobacter* K131 el grosor fue mayor que el control, sin presentar diferencias significativas; finalmente, la cepa *Enterobacter* N9 presentó una diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$) en el grosor siendo mayor con respecto al control (Tabla 1).

Cabe destacar que el análisis del GM mostró que la inoculación de Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV) impacta directamente en el desarrollo de *O. ficus-indica*, donde la cepa *Enterobacter* N9 demostró ser el tratamiento más efectivo para aumentar el vigor del nopal. Cabe destacar que, si bien, el nopal tiene la capacidad de desarrollarse en suelos irrigados con aguas residuales de forma natural, la inoculación de BPCV, en especial de *Enterobacter* N9, optimiza su grosor, un indicador de mayor biomasa aérea y, por lo tanto, de mayor producto que se puede cosechar, lo cual beneficia al productor y mejora su calidad ante el consumidor final.

Tabla 1. Efecto de los tratamientos en el grosor del cladodio madre de *O. ficus-indica*.

Table 1. Effect of treatments on the thickness of the mother cladode of *O. ficus-indica*.

Tratamiento	GM (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
<i>Serratia</i> K120	34.68 ± 1.85 ^{ab1}	34.89 ± 2.38 ^{ab}	35.10 ± 2.12 ^a	36.85 ± 2.60 ^a
<i>Serratia</i> MC119	35.15 ± 1.85 ^{ab}	33.09 ± 2.38 ^{ab}	25.18 ± 2.12 ^b	34.25 ± 2.60 ^a
<i>Enterobacter</i> K131	31.69 ± 1.85 ^b	32.03 ± 2.38 ^b	37.08 ± 2.12 ^a	32.27 ± 2.60 ^a
<i>E. coli</i> N16	30.30 ± 1.85 ^b	32.35 ± 2.38 ^{ab}	33.82 ± 2.12 ^{ab}	34.02 ± 2.60 ^a
<i>Enterobacter</i> N9	40.72 ± 1.85 ^a	42.02 ± 2.38 ^a	35.85 ± 2.12 ^a	35.49 ± 2.60 ^a
Control	33.10 ± 1.86 ^{ab}	34.69 ± 2.39 ^{ab}	32.16 ± 2.13 ^{ab}	31.51 ± 4.51 ^a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). GM: Grosor de cladodio madre.

¹Means followed by the same letter within a column are not significantly different according to Tukey's test ($p \leq 0.05$). GM: mother cladode thickness.

3.2. Análisis de elementos potencialmente tóxicos en nopal

El análisis de la determinación de Pb en los cladodios demostró una concentración significativamente mayor en las plantas inoculadas con las cepas *Serratia* MC 119 y *E. coli* N16 con respecto al control (Tabla 2). Por su parte, cuando se inocularon con la cepa *Serratia* K120, la concentración fue significativamente ($p \leq 0.05$) menor con respecto al control en la parcela 1, mientras que en la parcela 2 no se encontró Pb.

Tabla 2. Efecto de los tratamientos en concentración de Pb de *O. ficus-indica* a cielo abierto inoculado con BPCV.

Table 2. Effect of treatments on Pb concentration of *O. ficus-indica* under open-field conditions inoculated with PGPR.

Tratamiento	Pb (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
<i>Serratia</i> K120	5.76 ± 2.42 ^{b1}	No se detectó Pb
<i>Serratia</i> MC119	16.88 ± 2.42 ^a	
<i>Enterobacter</i> K131	15.14 ± 2.42 ^{ab}	
<i>E. coli</i> N16	18.50 ± 2.42 ^a	
<i>Enterobacter</i> N9	14.62 ± 2.42 ^{ab}	
Control	13.24 ± 2.42 ^{ab}	

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

¹Means followed by the same letter within a column are not significantly different according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Por otra parte, la concentración de Zn fue similar en las plantas inoculadas con las bacterias y el control tanto en la parcela 1 como en la 2. Solamente las plantas de la parcela 2, inoculadas con la cepa *Serratia* K120, mostraron tener una mayor concentración de manera significativa ($p \leq 0.05$) con respecto al control (Tabla 3).

Tabla 3. Efecto de los tratamientos en concentración de Zn de *O. ficus-indica* a cielo abierto inoculado con BPCV.

Table 3. Effect of treatments on Zn concentration of *O. ficus-indica* under open-field conditions inoculated with PGPR.

Tratamiento	Zn (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
<i>Serratia</i> K120	21.24 ± 2.36 ^{a1}	24.16 ± 1.48 ^a
<i>Serratia</i> MC119	26.28 ± 2.36 ^a	18.26 ± 1.48 ^{ab}
<i>Enterobacter</i> K131	23.64 ± 2.36 ^a	19.38 ± 1.48 ^{ab}
<i>E. coli</i> N16	27.00 ± 2.36 ^a	17.10 ± 1.48 ^b
<i>Enterobacter</i> N9	23.70 ± 2.36 ^a	15.90 ± 1.48 ^b
Control	24.48 ± 2.36 ^a	17.12 ± 1.48 ^b

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

¹Means followed by the same letter within a column are not significantly different according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Las cepas *Serratia* MC119 y *E. coli* N16 contribuyen a la transferencia del plomo a la planta con diferencias significativas, con respecto al control, funcionando como un sistema de acumulación; sin embargo, la cepa *Serratia* K120 tiene un efecto contrario a las cepas anteriores, disminuyendo la transferencia del plomo a la planta con una diferencia significativa con respecto al control, permitiendo que se produzca una fitoestabilización del plomo.

3.3. Transferencia, translocación y bioacumulación de plomo y zinc

Se determinaron en suelo concentraciones (C_s) de 20 ppm de Pb y 63 ppm de Zn en la parcela 1, así como de 2 ppm de Pb y 29 ppm de Zn en la parcela 2. Asimismo, se determinaron concentraciones en el agua del canal de riego en época de lluvia de Pb y Zn de 0.163 y 0.142 mg/L, respectivamente.

Tabla 4. Concentraciones de Pb y Zn en la parte área (C_A) y radical (C_R) de *O. ficus-indica* inoculado con BPCV.

Table 4. Pb and Zn concentrations in the shoot (C_A) and root (C_R) of *O. ficus-indica* inoculated with PGPR.

	C _A ¹		C _R		C _A		C _R	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
<i>Serratia</i> K120	5.76		15.74		21.24	24.16	46.06	9.14
<i>Serratia</i> MC119	16.88		5.62		26.28	18.26	44.12	18.14
<i>Enterobacter</i> K131	15.14	ND	7.56	ND	23.64	19.38	47.76	18.02
<i>E. coli</i> N16	18.5		4.1		27	17.1	45.4	21.3
<i>Enterobacter</i> N9	14.62		7.78		23.7	15.9	45.2	19
Control	13.24		14.76		24.48	17.12	54.32	27.68

¹C_A: Concentración del metal en la parte aérea. C_R: concentración del metal en la raíz. ND: No se detectó.

¹C_A: Metal concentration in the aerial part. C_R: metal concentration in the root. ND: not detected.

Con los datos de concentración de Pb y Zn en suelo, así como de las concentraciones de dichos metales, tanto en la parte área (C_A) como en la radical (C_R) presentados en la tabla 5, se determinaron los factores de translocación y bioacumulación de plomo (Tabla 5) y zinc (Tabla 6).

Tabla 5. Factores de translocación y bioacumulación de plomo en *O. ficus-indica* inoculado con BPCV.

Table 5. Translocation and bioaccumulation factors of lead in *O. ficus-indica* inoculated with PGPR.

Tratamiento	FT _A ¹ Pb		FT _R Pb		FT Pb		FB Pb	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
<i>Serratia</i> K120	0.29		0.79		0.37		1.08	
<i>Serratia</i> MC119	0.84		0.28		3.00		1.13	
<i>Enterobacter</i> K131	0.76	NA	0.38	NA	2.00	NA	1.14	NA
<i>E. coli</i> N16	0.93		0.21		4.51		1.13	
<i>Enterobacter</i> N9	0.73		0.39		1.88		1.12	
Control	0.66		0.74		0.90		1.40	

¹FT_A: Factor de transferencia en la parte aérea. FT_R: Factor de transferencia en la raíz. FT: Factor de translocación. FB: Factor de bioacumulación. NA: No aplica.

¹FT_A: Transfer factor in the aerial part. FT_R: transfer factor in the root. FT: translocation factor. FB: bioaccumulation factor. NA: not applicable.

Tabla 6. Factores de translocación y bioacumulación de zinc en *O. ficus-indica* inoculado con BPCV.

Table 6. Translocation and bioaccumulation factors of zinc in *O. ficus-indica* inoculated with PGPR.

Tratamiento	FT _A ¹ Zn		FT _R Zn		FT Zn		FB Zn	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
<i>Serratia</i> K120	0.34	0.83	0.73	0.32	0.46	2.64	1.57	1.65
<i>Serratia</i> MC119	0.42	0.63	0.70	0.63	0.60	1.01	1.12	1.26
<i>Enterobacter</i> K131	0.38	0.67	0.76	0.62	0.49	1.08	1.13	1.29
<i>E. coli</i> N16	0.43	0.59	0.72	0.73	0.59	0.80	1.15	1.32
<i>Enterobacter</i> N9	0.38	0.55	0.72	0.66	0.52	0.84	1.09	1.20
Control	0.39	0.59	0.86	0.95	0.45	0.62	1.25	1.54

¹FT_A: Factor de transferencia en la parte aérea. FT_R: Factor de transferencia en la raíz. FT: Factor de translocación. FB: Factor de bioacumulación. NA: No aplica.

¹FT_A: Transfer factor in the aerial part. FT_R: transfer factor in the root. FT: translocation factor. FB: bioaccumulation factor. NA: not applicable.

4. Discusión

El regado de los cultivos con aguas residuales incrementa la concentración de EPT en el suelo de los sistemas agrícolas, siendo esto una preocupación creciente debido a que impactan negativamente al medio ambiente, la salud humana y en la productividad de los cultivos causando alteraciones en las plantas y una bioacumulación que provoca una magnificación de estos como sucede en los diversos cultivos entre los que se encuentran los cultivos de nopal. Las BPCV probadas en este estudio no se han usado anteriormente en cultivos de *O. ficus-indica* cultivar Atlixco, por lo que establece un trabajo pionero para la problemática generada en los sistemas de riego debido a la escasez de agua para riego.

A pesar de los tratamientos realizados con las BPCV que presentaron la capacidad de disminuir la absorción de Pb en su concentración presente en el nopal rebasó los límites permisibles establecidos tanto por el Codex Alimentarius (2025), como por la normatividad de la Comunidad Europea (Unión Europea, 2021) que es < 0.3 mg/kg en ambos casos, esto se debe a la elevada bioacumulación de Pb en el suelo por el regado de aguas negras que contienen este EPT.

Sin embargo, el análisis de la concentración de Pb reveló diferencias significativas (Tukey $p \leq 0.05$) de las plantas de nopal verdura inoculadas con *Serratia* K120 en comparación con las demás cepas bacterianas y el control, logrando reducir la absorción en un 56.5 %; es decir, la inoculación con *Serratia* K120 evitó la absorción de más de la mitad del contaminante que pudo acumularse sin tratamiento, consolidándose como una auténtica barrera biológica de seguridad. Con la inoculación de *Serratia* K120, la concentración de Pb en el tejido vegetal de nopal verdura logró ser menor, lo cual es benéfico para propósitos alimen-

tarios. Mientras tanto, con la inoculación de la BPCV *E. coli* N16 se incrementó la acumulación de Pb en la parte aérea en mayor proporción con respecto a las demás cepas bacterianas y el control (Tukey $p \leq 0.05$).

Conforme a lo hallado por Hayek *et al.* (2017), el nopal se podría considerar un biomonitor de Pb, ya que se identificó que bioabsorbe este elemento sembrado a cielo abierto; no obstante, esta capacidad se modifica en función del tipo de BPCV. Por su parte, Mendoza-Hernández *et al.* (2017) concluyeron que *Serratia* K120 incrementó la capacidad bioabsorbente de micronutrientes y macronutrientes en plantas de chícharo, calabaza y girasol, lo cual logró identificarse en el presente estudio sobre el incremento de la capacidad de bioabsorber Zn por nopal verdura (Tukey, $p \leq 0.05$).

Respecto a la concentración de Zn, un elemento esencial para el desarrollo vegetal se observó que la inoculación con la BPCV modificó la capacidad de absorción en comparación con el control, aunque sin una tendencia uniforme entre las parcelas. En la Parcela 1, la mayor acumulación se obtuvo con la cepa *E. coli* N16 con 27 ppm, mientras que en la Parcela 2, *Serratia* K120 presentó la mayor concentración de manera significativa (24.16 ppm, Tukey $p \leq 0.05$). Es destacable que el factor de bioacumulación (FB) para Zn fue superior a 1 en todos los tratamientos y en ambas parcelas, lo que confirma la capacidad natural del nopal para acumular este micronutriente en suelos irrigados con aguas residuales.

O. ficus-indica cultivar Atlixco inoculado con la BPCV *Serratia* K120 (Tukey, $p \leq 0.05$), tiene efectos de fitoestabilización al disminuir la biodisponibilidad y la movilidad de Pb con lo que, de acuerdo con López-Martínez *et al.* (2005) y Alvarado *et al.* (2011), podría impedir que este elemento se transfiera a capas subterráneas o a la atmósfera e inmovilizar el Pb en el suelo a través de las raíces.

Los EPT producen estrés en la planta al incrementar la producción de especies reactivas de oxígeno y reducir la actividad enzimática. Sin embargo, se ha demostrado que la inoculación con bacterias como *Enterobacter* sp. en *Pisum sativum* L. promueve el desarrollo vegetal estimulando el crecimiento de tallos y raíces e incrementando el contenido de pigmentos fotosintéticos (Singh *et al.*, 2023). Un efecto similar se observó en *Helianthus annuus* durante la fitorremediación de jales mineros con el uso de *Serratia* (Pacheco *et al.*, 2026). *Enterobacter* y *Serratia* fueron géneros bacterianos empleados en este estudio para *O. ficus-indica*.

De acuerdo con Glick (2014), el incremento en el grosor y biomasa de los tejidos vegetales en presencia de EPT inoculados con géneros bacterianos como *Enterobacter*, sugiere una regulación decreciente de etileno mediante la enzima ACC desaminasa. En el caso de *O. ficus-indica*, este mecanismo permite que el parénquima clorífico mantenga procesos de división celular y expansión de tejidos, los cuales normalmente se verían inhibidos por el estrés oxidativo causado por el plomo.

Según Boechat *et al.* (2018), la diferencia de resultados entre parcelas sugiere que existe un umbral de activación para desencadenar los mecanismos de fitoestabilización bacteriana. Mientras que la presión selectiva sobre la microbiota es menor en suelos con

baja concentración de Pb, como en la Parcela 2, en suelos con alta carga, como en la Parcela 1, la simbiosis planta-bacteria es crítica, por lo que la inoculación con *Serratia* o *Enterobacter* muestran su máximo potencial al mitigar niveles de toxicidad que, de otra manera podrían ser letales o inhibitorios para el cultivo. Esto tiene implicaciones para promover la mitigación de riesgos en suelos contaminados.

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal tienen la capacidad de ayudar al proceso de fitoestabilización inmovilizando Cu, Cd, Zn, Pb, As, Fe, Mn (Alves *et al.*, 2022; Ketaubon *et al.*, 2024; Ahemad, 2014; Mendoza *et al.*, 2023) disminuyendo la biodisponibilidad de los metales debido a procesos de inmovilización de metales por la producción de exopolisacáridos, sideróforos, producción de ácidos orgánicos para la solubilización de fosfatos, el secuestro en la matriz extracelular, la biosorción en la pared celular, la precipitación, las reacciones de oxidación-reducción, el transporte a través de la membrana celular y la síntesis de la proteína de unión a metales (Alves *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2016; Kaushal y Pati, 2025).

Los géneros de BPCV mencionadas anteriormente presentaron la capacidad de fitoestabilización de Pb en los cultivos de nopal. Estas bacterias evitan la concentración en diversas partes de la planta debido a que disminuyen su translocación en los frutos, como también la bioacumulación. Lo anterior, coincide con lo reportado por Vishnupradeep *et al.* (2022) en cultivos de maíz (*Z. mays*) usando *Providencia* sp. (TCR05), una especie de bacteria gramnegativa perteneciente a la familia *Enterobacteriaceae*, así como *Proteus mirabilis* (TCR20), perteneciente a la familia *Morganellaceae*, pero también del orden de las enterobacterias.

El uso de las BPCV que tienen la capacidad de resistencia a elevadas concentraciones de EPT (Mendoza-Hernández *et al.*, 2019) implica que puedan ser usadas como bioinoculantes en sistemas agrícolas irrigados con aguas residuales ya que, aparte del crecimiento, aumentando la biomasa, el rendimiento y la calidad nutricional de las plantas, permiten disminuir el consumo de verdura con EPT que implicaría daños a la salud de las personas que lo consumen.

Además de validar una respuesta biológica, los resultados que se obtuvieron con *Serratia* K120 fundamentan un modelo de inoculación como barrera biológica, donde las BPCV actúan como una interfaz crítica entre los suelos contaminados con EPT y la calidad del alimento cosechado, lo que se consolida como parte de una estrategia integral para promover la seguridad alimentaria en sistemas agrícolas que han sido irrigados con aguas residuales. Al reducir la translocación de Pb a la parte aérea del nopal, que es la parte comestible, esta biotecnología permite realizar una gestión del riesgo técnico sin desplazar la actividad económica del productor, quien depende de los ingresos que obtiene con la venta del nopal verdura.

La estrategia de inoculación de BPCV como agentes de fitoestabilización en el cultivo de *O. ficus-indica*, además de ser eficaz en términos biotecnológicos, tiene la capacidad de situarse en el marco de la ciencia ciudadana (D'Onofrio *et al.*, 2024). Lo anterior debido a que su implementación puede llevarse a cabo por los mismos productores, en atención a la

mejora en la salud de los suelos en sus parcelas (Fausak *et al.*, 2024), así como de la inocuidad de sus productos.

Al demostrar una reducción del 56.5 % en la translocación de Pb hacia los cladodios, se ofrece una base empírica como parte de un sistema de gestión integral del riesgo en la cuenca del río Atoyac. Sin embargo, su viabilidad a largo plazo no depende exclusivamente del éxito bajo condiciones experimentales controladas, sino de la integración del saber local del productor en el Valle de Atlixco. a pesar del potencial de las BPCV para que la planta logre estabilizar metales en la rizosfera, su capacidad de secuestro tiene un límite fisiológico, por lo que la inoculación es una estrategia complementaria de mitigación de riesgos ambientales, pero no sustituye al tratamiento de las aguas residuales previo al encausamiento en los canales de irrigación.

La gestión de los agroecosistemas debe estar regulado por políticas públicas más efectivas de saneamiento, en particular de los canales de riego en la cuenca hidrológica del río Alto Atoyac, ya que la bioacumulación de EPT en tejidos comestibles puede persistir por encima de los límites máximos permisibles establecidos por el Codex Alimentarius si los suelos mantienen una alta carga contaminante. Por ello, es fundamental establecer una sinergia entre la innovación biotecnológica con BPCV y la participación comunitaria. Esta colaboración permite proveer estrategias con validez científica a los productores del Valle de Atlixco quienes, al poseer un conocimiento vital de su entorno (Ostrom, 2000) pueden transitar de la conciencia del problema ambiental a la implementación de soluciones socialmente aceptables y éticamente responsables.

La mitigación de la concentración de EPT en el suelo de sistemas agrícolas irrigados con aguas residuales genera una estrategia biotecnológica viable a través de la fitoestabilización, depende de la aceptabilidad social y de la percepción del riesgo del productor en el marco de un sistema de gestión integrado de riesgos ambientales.

5. Conclusiones

Las BPCV contribuyen a mejorar el grosor de los cladodios de nopal, lo que beneficia la calidad del producto y lo hace más atractivo para su comercialización. El uso de *Enterobacter* N9 facilitó la absorción de Zn lo que la refuerza como cepa eficaz para promover la nutrición y crecimiento de nopal verdura. La inoculación con la cepa *Serratia* K120 de las plantas de nopal regadas con aguas residuales que contienen EPT contribuye a disminuir la transferencia y la bioacumulación de Pb contribuyendo a una fitoestabilización en las plantas beneficiando su uso para consumo humano. La respuesta de *O. ficus-indica* a la inoculación con BPCV depende intrínsecamente de la carga contaminante inicial del suelo.

Los niveles finales de Pb en el suelo demuestran que la fitoestabilización como biotecnología tiene el potencial de consolidarse como una solución integrada al sistema de remediación de los suelos agrícolas que involucren el necesario y urgente saneamiento del agua en los canales de riego abastecidos con el río Alto Atoyac.

La mitigación de la concentración de EPT en el suelo de sistemas agrícolas irrigados con aguas residuales genera una estrategia biotecnológica viable a través de la fitoestabilización, depende de la aceptabilidad social y de la percepción del riesgo del productor en el marco de un sistema de gestión integrado de riesgos ambientales.

Agradecimientos

Victoria Téllez agradece la beca otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (antes CONACyT).

Contribución de los autores

Victoria Téllez Pérez: Conceptualización, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción– borrador original. **Ignacio Ocampo Fletes:** Conceptualización, metodología, supervisión. **Mario Alberto Tornero Campante:** Metodología, supervisión. **Pedro Antonio López:** Metodología, análisis formal, curación de datos, administración del proyecto, obtención del financiamiento. **Luis Alberto Villarreal Manzo:** Conceptualización, supervisión. **José Carlos Mendoza Hernández:** Conceptualización, metodología, validación, recursos, redacción– borrador original, redacción- revisión y edición, visualización.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

Ahemad, M. 2014. Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: Paradigms and prospects. Arab. J. Chem. 12(7) 1365 – 1377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.020>

Alvarado, C.J., Dasgupta-Schubert, N., Ambriz, E., Sánchez-Yañez, J.M. and Villegas, J. 2011. Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. Rev. Int. Contam. Ambient. 27(4),357-364. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992011000400008&lng=es&tlng=es

Alves, A.R.A., Yin, Q., Oliveira, R.S., Silva, E.F. and Ribeiro, I. 2022. Plant growth-promoting bacteria in phytoremediation of metal-polluted soils: Current knowledge and future directions. Sci. Total Environ. 838, 156435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156435>

Boechat, C.L., Quadros, P.D., Giovanella, P., Brito, A.C.C., Carlos, F.S., Sá, E.L.S. and Camargo, F.A.O. 2018. Metal-resistant rhizobacteria change soluble-exchangeable fraction

in multi-metal-contaminated soil samples. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 42, Artículo e0170266. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170266>

Carrillo-González, R., Perea-Vélez, Y.S. and González-Chávez, M.C.A. 2017. Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos. *Agroproductividad*, 10(4), 15-20. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/990/848>, (consultado mayo 24, 2026).

Codex Alimentarius (CA), 2025. General standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; Organización Mundial de la Salud. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf, (consultado mayo 24, 2026).

D'Onofrio, G., Arza, V. and Actis, G. 2024. Ciencia ciudadana en América Latina. *Perfiles Educ.*, 46(184), 194–204. <https://doi.org/10.22201/iissue.24486167e.2024.184.61781>

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M. and Robledo, C.W. 2014. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>, (consultado mayo 24, 2026).

Duclas, N., Almaraz-Suarez, J.J., Alatorre-Rosas, R., Benedicto-Valdes, S. and Espinosa-Hernandez, V. 2026. Biostimulation of lettuce growth with rhizobacteria in order to produce seedlings in seedbed. *Mex. J. Biotechnol.* 11(2), 64–76. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2026.11.2.64-76>

Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). 2019. Encuesta Nacional Agropecuaria. Datos Abiertos, México. https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/#Datos_abiertos, (consultado mayo 24, 2026).

Environmental Protection Agency (EPA). 1996. Method 3052 Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices, Estados Unidos. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3052.pdf>, (consultado mayo 24, 2026).

Fausak L.K., Bridson N., Diaz-Osorio F., Jassal R.S. and Lavkulich L.M. 2024. Soil health – a perspective. *Front. Soil Sci.* 4:1462428. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>

Freire-Vinueza, C., Meneses, K. and Cuesta, G. 2021. América Latina ¿Un paraíso de la contaminación ambiental? *Rev. Cienc. Ambient.* 55(2), 1-18. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.1>

Glick, B.R. 2014. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiol. Res.* 169(1), 30-39. ISSN 0944-5013. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>

Hayek, E.E., Samrani, A.E., Lartiges, B., Kazpard, V. and Aigouy, T. 2017. Lead bioaccumulation in *Opuntia ficus-indica* following foliar or root exposure to lead-bearing apatite. Environ. Pollut. 220(B), 779-787. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.046>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2019. Cuenca hidrológica Alto Atoyac: humedales: informe técnico. 1. Alto Atoyac, Cuenca (México, estado) - Hidrografía – Informes, México. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825189884.pdf, (consultado mayo 24, 2026).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2022. Información topográfica a escala 1:50,000 y sus actualizaciones. <https://www.inegi.org.mx/programas/topografia/50000/>, (consultado mayo 24, 2026)

Kaushal, P. and Pati, A.M. 2025. Unleashing rhizobacteria for sustainable soil remediation: PGPR roles in heavy metal tolerance, detoxification, and plant productivity. Front. Microbiol. 16, 1662000. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1662000>

Ketaubon, P., Tondee, T. and Prapagdee, B. 2024. Enhancing heavy metal phytoremediation in landfill soil by *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty through the application of bacterial-biochar pellets. Environ. Technol. Innov. 35, 103732. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103732>

López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M.E., Pérez-Flores, L.J. and Gutiérrez-Rojas, M. 2005. Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. Rev. Int. Contam. Ambient. 21(2), 91-100. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992005000200091&lng=es&tlng=es.

Mendoza Hernández, J.C., Arriola Morales, J., Castillo Morales, M., Santamaria Juarez, J. D. and Urbina Trinidad, P.A. 2023. Análisis del efecto de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la redistribución de elementos potencialmente tóxicos en jales de minas. Acta Univ. 33, 1-11. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3799>

Mendoza-Hernández, J.C., Castillo-Morales, M., García-Grijalva, B.L., Muñoz-González, I., Arriola-Morales, J., Vega-Hernández, M. and Pérez-Orsorio, G. 2017. Evaluación en el crecimiento y nutrición de las plantas de chícharo (*Pisum sativum*), calabaza (*Cucurbita pepo*) y girasol (*Helianthus annuus*) inoculadas con BPCV. J. Agric. Environ. Sci. 6(2), 42-53. https://jaes.thebrpi.org/journals/jaes/Vol_6_No_2_December_2017/6.pdf, (consultado mayo 24, 2026).

Mendoza-Hernández, J.C., Vázquez-Delgado, O.R., Castillo-Morales, M., Varela-Caselis, J.L., Santamaría-Juárez, J.D., Olivares-Xometl, O., Arriola Morales, J. and Pérez-Orsorio, G. 2019. Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria. Microbiol. Res. 228, 126308. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126308>

Mendoza-Retana, S.S., Cervantes-Vázquez, M.G., Valenzuela-Garcia, A.A., Guzmán-Silos, T.L., Orona-Castillo, I. and Cervantes-Vázquez, T.J.A. 2021. Uso potencial de las aguas

residuales en la agricultura. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 12(1), 115-126. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789>

Mendoza, J.C., Perea, Y.S., Arriola, J., Martínez, S.M. and Pérez, G. 2016. Assessing the effects of heavy metals in ACC deaminase and IAA production on plant growth promoting bacteria. Microbiol. Res. 188-189, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.05.001>

Morales-García, S.S., Rodríguez-Espinosa, P.F., Shruti, V.C., Jonathan, M.P. and Martínez-Tavera, E. 2017. Metal concentrations in aquatic environments of Puebla River basin, Mexico: natural and industrial influences. Environ. Sci. Pollut. Res. 24(3), 2589-2604. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8004-3>

Morales, H. 2012. Orígenes de la industria eléctrica en Puebla. México. La Hidroeléctrica de El Portezuelo. 1899-1910. Simposio Internacional Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930. Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos. Universidad de Barcelona, Facultad de Geografía e Historia, Barcelona. https://www.ub.edu/geocrit/Simposio/cMorales_Origenes.pdf, (consultado mayo 24, 2026).

Ortiz-Pérez, E.L., Bocanegra-García, V., Mendoza-Herrera, A. and Cruz-Hernández, M.A. 2019. Identification of bacterial strains tolerant to pesticides from agricultural soils. Mex. J. Biotechnol. 4(3), 57–78. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.3.57>

Ostrom, E. 2000. El gobierno de los bienes comunes: La evolución de las instituciones de acción colectiva (F. Guzmán, Trad.). Fondo de Cultura Económica, Ciudad de México. <https://katiuskaolivera.github.io/files/Ostrom.E%20-%20EI%20go-bierno%20de%20los%20bienes%20comunes.pdf>, (consultado mayo 24, 2026).

Pacheco, P., Hernández, J., Contreras, M., Juárez, J.D. and Juárez Meneses, M. 2026. Fitorremediación de jales de mina con *Helianthus annuus* asistida por consorcios de bacterias promotoras del crecimiento vegetal. Acta Univ. 36, 1–12. <https://doi.org/10.15174/au.2026.4352>

Robledo-Zacarías, V.H., Velázquez-Machuca, M.A., Montañez-Soto, J.L., Pimentel-Equihua, J.L., Vallejo-Cardona, A.A., López-Calvillo, M.D. and Venegas-González, J. 2017. Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 33(2), 221–235. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.04>

Sánchez-Corona, C.G., Gonzalez-Avila, L.U., Hernández-Cortez, C., Rojas-Vargas, J., Castro-Escarpulli, G. and Castelán-Sánchez, H.G. 2025. Impact of Heavy Metal and Resistance Genes on Antimicrobial Resistance: Ecological and Public Health Implications. Genes, 16(6), 625. <https://doi.org/10.3390/genes16060625>

Secretaría de Economía (SE). 2016. NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales

tratadas - Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-051-scfi-2016.pdf>, (consultado mayo 24, 2026).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>, (consultado mayo 24, 2026).

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2022. Cierre de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/, (consultado mayo 24, 2026).

Sharma, S., Kulkarni, J. and Jha, B. 2016. Halotolerant Rhizobacteria Promote Growth and Enhance Salinity Tolerance in Peanut. *Front. Microbiol.* 7:1600. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01600>

Singh, A., Mazahar, S., Chapadgaonkar, S. S., Giri, P. and Shourie, A. 2023. Phyto-microbiome to mitigate abiotic stress in crop plants. *Front. Microbiol.* 14, Artículo 1210890. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1210890>

Téllez, V., Ocampo, I., Tornero, M.A., López, P.A., Villarreal, L.A. and Mendoza, J.C. 2023. Percepción de los agricultores sobre el riesgo por el uso de agua residual para riego en la zona de Atlixco, Puebla. *Acta Univ.* 33, e3676. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3676>

Unión Europea (UE). 2021. Reglamento (UE) 2021/1317 De La Comisión de 9 de agosto de 2021 por el que se modifica el Reglamento (CE) No 1881/2006 en lo relativo a los contenidos máximos de plomo en determinados productos alimenticios. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1317&from=ES> (consultado mayo 24, 2026).

Velázquez-Rodríguez, M.G., Volke-Sepúlveda, T.L. and Figueroa-Martínez, F.J. 2025. Co-cultures of endophytic microorganisms: A strategy to produce bioestimulants and value-added compounds. *Mex. J. Biotechnol.* 10(1), 61–85. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2025.10.1.61>

Vishnupradeep, R., Benedict Bruno, L., Taj, Z., Karthik, C., Challabathula, D., Tripti, Kumar, A., Freitas, H. and Rajkumar, M. 2022. Plant growth promoting bacteria improve growth and phytostabilization potential of *Zea mays* under chromium and drought stress by altering photosynthetic and antioxidant responses. *Environ. Technol. Innov.* 25, 102154. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102154>