

EVALUACIÓN DE BACTERIAS ELECTROGÉNICAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SU RESPUESTA AL ESTRÉS POR PLOMO EN CONDICIONES EXPERIMENTALES

EVALUATION OF ELECTROGENIC PLANT GROWTH PROMOTING BACTERIA AND THEIR RESPONSE TO LEAD INDUCED STRESS UNDER EXPERIMENTAL CONDITIONS

Alex Guambo-Galarza¹, María Alejandra Chalán², Mabel Lagla-Molina³, Jennifer Alexandra Orejuela-Romero⁴, Norma Erazo⁵

{aguambo@esPOCH.edu.ec¹, heidiale7@hotmail.com², jhoselinlagla380@gmail.com³, alexandra.orejuela@esPOCH.edu.ec⁴, norma.erazo@esPOCH.edu.ec⁵}

Fecha de recepción: 11/05/2026 / Fecha de aceptación: 18/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: El uso de bacterias electrogénicas que poseen capacidades bioestimulantes y biorremediadora ofrece una alternativa sostenible frente a la degradación de suelos y la contaminación por metales pesados. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial de la bacteria *Delftia acidovorans* (A1-40) y *Stenotrophomonas maltophilia* (C1-20) como promotoras del crecimiento vegetal, además de analizar su respuesta frente al estrés por plomo en condiciones experimentales. La identificación de las bacterias se realizó mediante secuenciación del gen 16S rADN, posteriormente se realizó una caracterización metabólica a través de ensayos de producción de ácido indolacético (IAA) y de la capacidad de solubilización de fosfatos. Posteriormente se evaluó su efecto sobre la germinación y desarrollo de *Solanum lycopersicum* y *Zea mays* L., junto con su tolerancia a diferentes concentraciones de plomo (0–1,5 mg/L). Los resultados demostraron que ambas cepas tienen actividad bioquímica favorable, destacando *D. acidovorans* por una mayor intensidad en la producción de IAA y una mejor capacidad de solubilización de fosfatos. En un entorno agrícola, los datos revelan efectos diferenciales en el crecimiento vegetal donde C1-20 beneficio principalmente la parte aérea y A1-40 mejoró el desarrollo de raíces y acumulación de biomasa. Aunque dentro de los análisis estadísticos no se mostró diferencias significativas ($p>0,05$), los análisis exploratorios permitieron identificar tendencias biológicas relevantes y las pruebas ambientales mostraron

¹Grupo de investigación y desarrollo para el ambiente y cambio climático (GIDAC), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador, <https://orcid.org/0000-0003-2631-1555>; +593 992861566

²Independent Research, Riobamba – Ecuador, <https://orcid.org/0009-0003-6242-671X>; +593 993632720

³Independent Research, Riobamba – Ecuador, <https://orcid.org/0009-0001-8331-0703>; +593 999044321

⁴Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Ciencias, Riobamba – Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-5500-1612>; +593 999417384

⁵Grupo de investigación y desarrollo para el ambiente y cambio climático (GIDAC), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador, <https://orcid.org/0000-0001-8495-1468>; +593 984402176

que ambas bacterias presentan tolerancia al plomo, aunque con una disminución del crecimiento bacteriano a medida que aumentó la concentración del metal, siendo este efecto el único factor con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). En conclusión, los hallazgos mostraron que estas bacterias poseen potencial para su aplicación en agricultura sostenible y procesos de biorremediación, aunque se requieren un mayor número de repeticiones para validar estadísticamente los efectos observados.

Palabras clave: *Bacterias electrogénicas; bioestimulación vegetal; biorremediación; estrés por plomo; Delftia acidovorans; Stenotrophomonas maltophilia*

ABSTRACT: The use of electrogenic bacteria with biostimulant and bioremediation capabilities offers a sustainable alternative to soil degradation and heavy metal contamination. This study aimed to evaluate the potential of the bacteria *Delftia acidovorans* (A1-40) and *Stenotrophomonas maltophilia* (C1-20) as plant growth promoters, as well as to analyze their response to lead stress under experimental conditions. The bacteria were identified by sequencing the 16S rDNA gene, and their metabolic characterization was subsequently performed using indoleacetic acid (IAA) production assays and phosphate solubilization capacity tests. Their effect on the germination and development of *Solanum lycopersicum* and *Zea mays* L. was then evaluated, along with their tolerance to different lead concentrations (0–1.5 mg/L). The results demonstrated that both strains exhibit favorable biochemical activity, with *D. acidovorans* standing out for its higher IAA production and improved phosphate solubilization capacity. In an agricultural setting, the data revealed differential effects on plant growth, with C1-20 primarily benefiting the shoot structure and A1-40 enhancing root development and biomass accumulation. Although statistical analyses showed no significant differences ($p > 0.05$), exploratory analyses identified relevant biological trends, and environmental tests showed that both bacteria exhibit lead tolerance, although bacterial growth decreased as the metal concentration increased. This effect was the only factor with statistically significant differences ($p < 0.05$). In conclusion, the findings suggest that these bacteria have potential for application in sustainable agriculture and bioremediation processes, although a greater number of replicates are required to statistically validate the observed effects.

Keywords: *Electrogenic bacteria; plant growth promotion; bioremediation; lead stress; Delftia acidovorans; Stenotrophomonas maltophilia*

INTRODUCCIÓN

La degradación de suelos agrícolas y la contaminación por metales pesados constituyen una de las principales problemáticas ambientales que afectan la sostenibilidad de los sistemas productivos a nivel global. Entre estos contaminantes, el plomo (Pb) destaca por su elevada persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación, lo que genera efectos adversos tanto en el microbiota del suelo como en el crecimiento y desarrollo de las plantas. En ecosistemas influenciados por actividades mineras e industriales, la presencia de este metal limita la

productividad agrícola y altera los ciclos biogeoquímicos, lo que hace necesario el desarrollo de estrategias que sean sostenibles para su mitigación (1),(2).

En este contexto, el uso y aprovechamiento de microorganismos funcionales ha emergido como una alternativa prometedora en el campo de la biotecnología ambiental y agrícola. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) desempeñan un papel clave en la mejora del desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos, tales como la producción de fitohormonas, también la solubilización de nutrientes y la inducción de tolerancia frente a estrés abiótico (3),(4). Entre estos mecanismos, la producción de ácido indolacético (IAA) es particularmente relevante, ya que regula procesos fisiológicos como la elongación celular, el desarrollo radicular y la absorción de agua y nutrientes (5),(6).

Asimismo, la capacidad de solubilizar fosfatos representa una característica fundamental de las PGPR, debido a que el fósforo es uno de los nutrientes esenciales más limitantes en el suelo, generalmente presente en formas insolubles. La actividad de estas bacterias permite incrementar la biodisponibilidad de fósforo en sistemas biológicos mediante la producción de ácidos orgánicos y de enzimas fosfatasas, contribuyendo significativamente al crecimiento vegetal (7),(8),(9).

Por otra parte, diversas bacterias han demostrado la capacidad de tolerar y transformar metales pesados mediante mecanismos como biosorción, bioacumulación, formación de biopelículas y sistemas de eflujo, lo que las posiciona como candidatas potenciales para procesos de biorremediación (10),(11). En este sentido, especies como *Delftia acidovorans* y *Stenotrophomonas maltophilia* han sido reportadas en ambientes contaminados, mostrando una notable capacidad de adaptación a condiciones de estrés metálico, además de poseer características funcionales asociadas a la promoción del crecimiento vegetal (2),(12).

Adicionalmente, estas bacterias han sido descritas como microorganismos con potencial electrogénico, capaces de transferir electrones hacia aceptores externos, lo que amplía su aplicabilidad en tecnologías emergentes como las celdas de combustible microbianas y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Esta dualidad funcional, tanto en la promoción del crecimiento vegetal como en la interacción con contaminantes, resalta su importancia en el desarrollo de soluciones integrales para sistemas agroambientales sostenibles (13),(14).

A pesar de los avances alcanzados, aún existen inquietudes respecto al comportamiento de bacterias electrogénicas bajo condiciones de estrés inducido por metales pesados y su efecto simultáneo sobre el desarrollo a nivel vegetal. La interacción entre microorganismos, plantas y contaminantes constituye un sistema complejo que requiere ser evaluado bajo condiciones experimentales controladas para determinar su mejor potencial en aplicaciones agrícolas y de biorremediación.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el potencial de bacterias electrogénicas como promotoras del crecimiento vegetal y su respuesta frente al estrés causado por plomo. Para ello, se trabajó con las cepas bacterianas *Delftia acidovorans* (A1-40) y *Stenotrophomonas maltophilia* (C1-20) identificadas molecularmente, las cuales fueron caracterizadas mediante pruebas bioquímicas relacionadas con la producción de ácido

indolacético y la solubilización de fosfatos. Además, se evaluó su efecto sobre la germinación y crecimiento de cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*) y maíz (*Zea mays*) por su interés agrícola, así como su tolerancia frente a diferentes concentraciones de plomo.

La hipótesis planteada propone que las bacterias electrogénicas seleccionadas influyen en el crecimiento vegetal y presentan respuestas diferenciales frente al estrés por plomo, lo que las convierte en herramientas biotecnológicas potenciales para la agricultura sostenible y la recuperación de suelos contaminados. De esta manera, los resultados de esta investigación buscan aportar evidencia científica que contribuya al desarrollo de estrategias basadas en microorganismos para mejorar la productividad agrícola y reducir los efectos de la contaminación ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio tuvo un enfoque experimental y se desarrolló en condiciones controladas de laboratorio, con el objetivo de evaluar el potencial de las bacterias electrogénicas seleccionadas como promotoras del crecimiento vegetal y su respuesta frente al estrés por plomo.

Reactivación y cultivo bacteriano

Se trabajó con dos cepas bacterianas previamente aisladas y conservadas en condiciones estériles que obtenidas de estudios previos en suelos altoandinos de la provincia de Chimborazo considerando que estos ambientes presentan propiedades óxido-reductoras particulares que favorecen la actividad microbiana. Las cepas usadas *Delftia acidovorans* y *Stenotrophomonas maltophilia* fueron identificadas con los códigos A1-40 y C1-20 respectivamente. Para la reactivación de las cepas se usó un cultivo en medio líquido (tubos de ensayo de 10 mL) e incubadas bajo condiciones controladas (28 °C, 48 h), verificando el crecimiento con la observación de turbidez y posterior formación de colonias en placas de Petri.

Identificación molecular de las cepas

La identificación molecular de las cepas se llevó a cabo mediante la extracción de ADN bacteriano utilizando el método de barcoding. Posteriormente, se amplificó el gen 16S rADN mediante reacción en cadena de la polimerasa (PCR), y los productos obtenidos fueron purificados y secuenciados utilizando el método de Sanger. Una vez secuenciado el gen fue analizado mediante herramientas bioinformáticas y comparadas con la base de datos GenBank del NCBI para determinar su identidad taxonómica.

Ensayos bioquímicos

En los ensayos bioquímicos se evaluó la capacidad de producción de ácido indolacético (IAA) y la solubilización de fosfatos. En el caso de la producción de IAA se determinó mediante el cultivo de las bacterias en presencia de L-triptófano como precursor (28 °C, 48 h), seguido de la adición del

reactivo de Salkowski. La reacción de color fue interpretada como resultado positivo, siendo evaluada de forma cualitativa en función de la intensidad del color (15).

La capacidad de solubilización de fosfatos se evaluó mediante la siembra de las cepas en un medio sólido rico en fosfato de calcio en medio Pikovskaya el cual fue incubado durante seis días. La formación de halos de solubilización alrededor de las colonias fue considerada como indicativa de actividad positiva (7), (8).

Evaluación del efecto en plantas

La evaluación del efecto de las bacterias sobre el crecimiento vegetal se realizó mediante ensayos de germinación en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) y maíz (*Zea mays*). Para el ensayo las semillas previamente esterilizadas fueron sometidas a tratamientos con cada una de las cepas bacterianas (de concentración 1×10^6 UFC/mL) en medio agar-agar y un grupo control sin inoculación. Estos ensayos se realizaron bajo condiciones controladas, registrando el porcentaje de germinación a los cinco días (28 °C, en oscuridad). Posteriormente, a los veinte días (26 ± 4 °C, 12 h de luz y 12 h de oscuridad), se evaluaron variables morfológicas de las plántulas, incluyendo número de hojas, peso fresco, peso seco, elongación de hoja, longitud de tallo, longitud de raíz (las mediciones de longitud se realizaron con un error instrumental de $\pm 0,03$ cm).

Ensayos de tolerancia a plomo

Para la evaluación de la tolerancia bacteriana al plomo, se diseñó un experimento completamente al azar en el que las cepas fueron expuestas a diferentes concentraciones del metal (0, 0,5, 1 y 1,5 mg/L), a partir de una solución de Nitrato de plomo [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] de grado analítico (99% de pureza, AccuStandard). El crecimiento bacteriano se determinó mediante el recuento de unidades formadoras de colonias (UFC/mL) en medio de cultivo sólido BD BBL™ Trypticase™ Soy Agar, realizando las siembras por triplicado. Este enfoque permitió evaluar la respuesta bacteriana frente al estrés metálico, considerando la variación en la densidad poblacional como indicador de tolerancia (10).

Análisis estadístico

Inicialmente con el fin de conocer la distribución de los datos obtenidos se aplicó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. A continuación, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar el efecto de los tratamientos bacterianos sobre las variables de crecimiento vegetal que fueron analizadas, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. En el caso de la respuesta bacteriana al plomo, se utilizó una prueba de ANOVA factorial, considerando como factores la concentración del metal y el tipo de bacteria, así como su interacción. Adicionalmente, para identificar patrones y tendencias en los datos se realizó análisis exploratorios usando diagrama de cajas y componentes principales (PCA).

Los experimentos se realizaron bajo condiciones controladas en laboratorio, para garantizar la reproducibilidad de los resultados mediante procedimientos estándar y el uso de repeticiones experimentales (Figura 1).

◆ EVALUACIÓN DE BACTERIAS ELECTROGÉNICAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SU RESPUESTA AL ESTRÉS POR PLOMO EN CONDICIONES EXPERIMENTALES

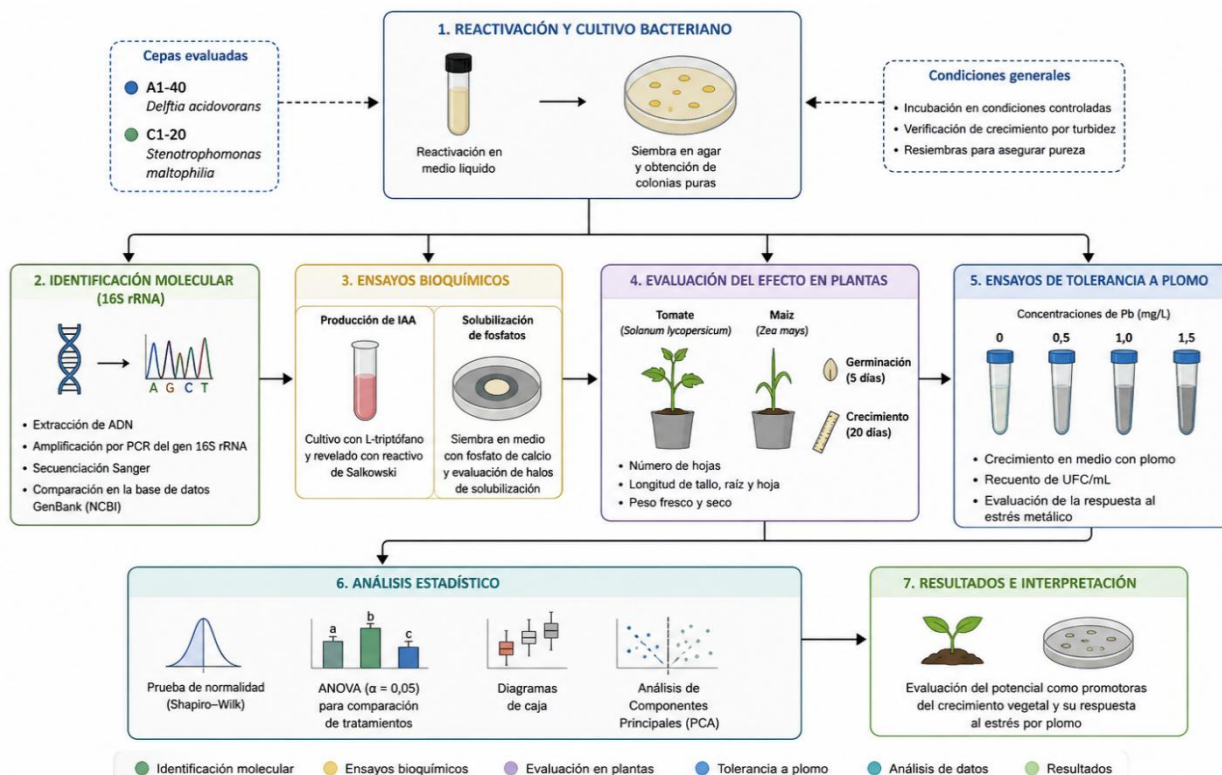


Figura 1. Esquema del diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Identificación molecular de las cepas bacterianas

La identificación molecular de las cepas bacterianas mediante la secuenciación del gen 16S rRNA permitió determinar con precisión su afiliación taxonómica. Los resultados evidenciaron que las cepas aisladas se identificaron como *Stenotrophomonas maltophilia* (C1-20) y *Delftia acidovorans* (A1-40), con un alto porcentaje de identidad dentro de los rangos aceptados para la identificación a nivel de especie mediante esta herramienta molecular, ampliamente utilizada en estudios microbiológicos (16). La verificación de estas especies es relevante debido a que ambas han sido reportadas en la literatura como bacterias con potencial biotecnológico, particularmente en procesos de promoción del crecimiento vegetal y resistente a condiciones de estrés ambiental por la contaminación de metales pesados (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación de las cepas bacterianas

Muestra	Organismo	Fragmento	% de Identidad	Nº Accesoión
C1-20	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	16S	99.64	CP040432.1
A1-40	<i>Delftia acidovorans</i>	16S	97.24	MG576160.1

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización metabólica: producción de IAA y solubilización de fosfatos

Con las pruebas bioquímicas realizadas se evidenció que ambas cepas bacterianas poseen capacidades metabólicas asociadas al crecimiento vegetal. En el caso del ácido indolacético (IAA) como hormona vinculada al crecimiento vegetal, lo que se evaluó es un cambio de coloración característico tras la adición del reactivo de Salkowski catalogándolo como un resultado positivo a la síntesis de esta fitohormona.

Las lecturas para los ensayos con *Delftia acidovorans* tuvieron una intensidad del color mayor, lo que sugiere notablemente una mejor producción de IAA en comparación con *Stenotrophomonas maltophilia*. Este resultado es consistente con lo reportado en la literatura, donde la producción de auxinas por bacterias rizosféricas se asocia con la elongación celular y el desarrollo radicular (3). Asimismo, la presencia de L-triptófano en el medio de cultivo actúa como precursor en rutas biosintéticas de IAA, favoreciendo su producción en condiciones experimentales (4).

En relación con la solubilización de fosfatos, ambas cepas mostraron la capacidad de generar halos de aclaramiento en medios sólidos suplementados con fosfato de calcio, lo que indica la liberación de compuestos capaces de transformar formas insolubles de fósforo en formas disponibles. *Delftia acidovorans* presentó halos de mayor tamaño, lo que sugiere una mayor eficiencia en este proceso. Este mecanismo ha sido ampliamente documentado como una estrategia clave de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal para incrementar la biodisponibilidad de nutrientes esenciales (7).

Los resultados de estas pruebas bioquímicas se muestran en la Figura 2 y 3, donde se evidencian las diferencias en intensidad de coloración y tamaño de halos entre ambas cepas.

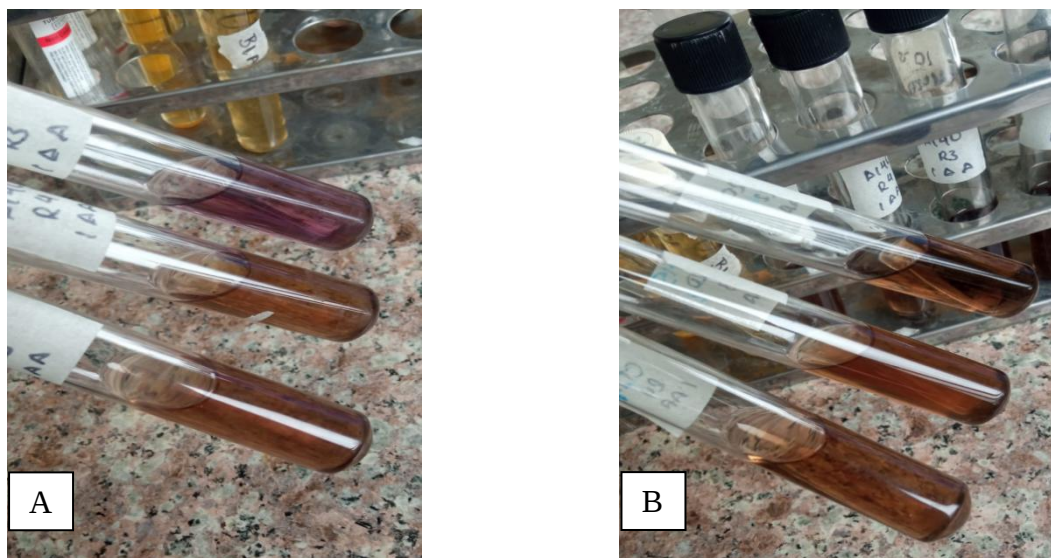


Figura 2. Producción de ácido indolacético (IAA) en las cepas evaluadas. A. *Delftia acidovorans* y B. *Stenotrophomonas maltophilia*

Fuente: Elaboración propia.

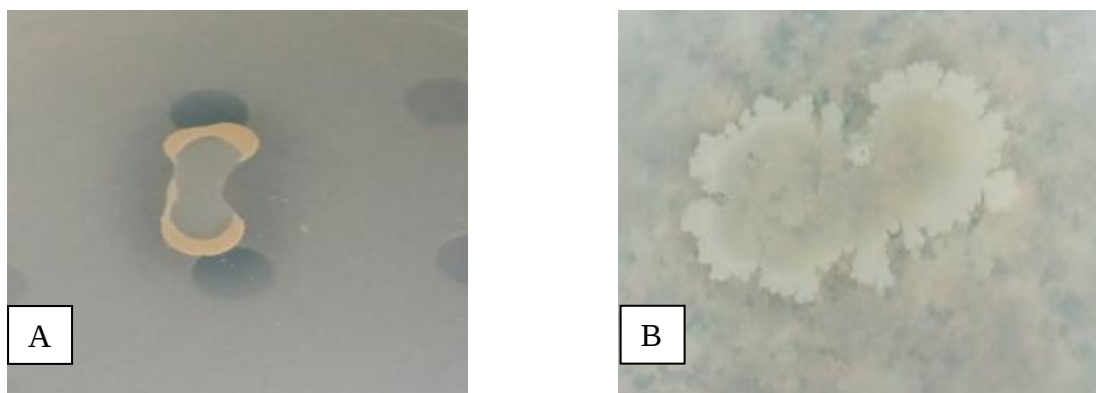


Figura 3. Capacidad de solubilización de fosfatos por las cepas bacterianas. A. *Delftia acidovorans* y B. *Stenotrophomonas maltophilia*

Fuente: Elaboración propia.

Efecto de las bacterias en la germinación de semillas

Los ensayos de germinación realizados en semillas de maíz (*Zea mays* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum*) mostraron respuestas variables según el tratamiento bacteriano aplicado. En el caso del maíz, los tratamientos con bacterias favorecieron la germinación en comparación con algunas réplicas de control, observándose valores más altos y un comportamiento estable frente a las semillas tratadas.

En los ensayos en tomate se evidenció respuestas diferenciadas entre los tratamientos evaluados. Sin embargo, el tratamiento con C1-20 presentó una respuesta favorable en el desarrollo de las plántulas, mientras que en el grupo de control (blanco) mostró valores menores en réplicas específicas. Por otro lado, la cepa A1-40 mostró una mayor variabilidad, lo que podría indicar que la interacción entre las bacterias y la planta depende de características propias de cada especie vegetal.

Estos resultados sugieren que algunos microorganismos pueden ejercer efectos beneficiosos sobre la germinación, aunque la magnitud de la respuesta depende tanto del tratamiento aplicado como de la especie evaluada. Este comportamiento coincide con estudios previos que describen a ciertas bacterias como promotoras del crecimiento vegetal y potenciales agentes de biocontrol en condiciones de estrés (12).

Los resultados de germinación se presentan en la Tabla 2, donde se comparan los porcentajes obtenidos para cada tratamiento en ambas especies vegetales.

Tabla 2. Germinación de semillas de tomate y maíz expresado en porcentajes.

TRATAMIENTO	TOMATE	MAÍZ
C1-20	75	33
	87,5	67
	87,5	83
A1-40	87,5	83
	62,5	100
	62,5	67
BLANCO	62,5	33
	75	100
	75	50

Fuente: Elaboración propia.

Crecimiento y desarrollo de plántulas

Las evaluaciones morfológicas a los 20 días posteriores a la germinación identificaron diferencias en el desarrollo de las plántulas según el tratamiento aplicado. En el cultivo de maíz con la aplicación de *Stenotrophomonas maltophilia* se logró obtener valores superiores en elongación foliar y altura de tallo, lo que sugiere una mayor influencia en el desarrollo de la parte aérea de la planta.

Por otro lado, con la aplicación *Delftia acidovorans* se obtuvo en mejor desarrollo radicular, evidenciado por mayores longitudes de raíz y menor variabilidad entre las repeticiones; este comportamiento se podría relacionar con su mayor capacidad de producción de IAA, hormona que favorece el crecimiento del sistema radicular.

En el caso del tomate, se observó una tendencia similar, con la aplicación de *Delftia acidovorans* se obtuvo una mayor elongación de raíz y en el incremento de peso seco, mientras que *Stenotrophomonas maltophilia* al igual que en el caso anterior presentó valores ligeramente superiores en variables asociadas con el área foliar. Estas diferencias funcionales observadas tras la aplicación de las cepas podrían estar asociadas de manera diferenciada a la producción de metabolitos secundarios, tales como sideróforos y fitohormonas, que influyen en la absorción de nutrientes y el desarrollo vegetal (17).

Finalmente, en los análisis de biomasa, tanto los valores de peso fresco y peso seco mostraron diversidad entre tratamientos, en particular con la aplicación de *Delftia acidovorans* los valores reportados para esta variable fueron mayores, lo que demuestra la capacidad de la cepa de influir en el vigor vegetativo de las plántulas.

Análisis estadístico y exploratorio de las variables vegetales

El análisis de varianza (ANOVA) determinó la ausencia de diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos sobre las variables morfológicas de respuesta en maíz y tomate. Esto nos demuestra que, bajo las condiciones experimentales evaluadas la aplicación de las cepas bacterianas no altera de forma importante las variables analizadas.

No obstante, variables como el número de hojas y la elongación foliar en la especie del tomate, mostraron tendencias próximas al nivel de significancia sugiriendo la existencia de ciertos patrones biológicos iniciales lo que requeriría realizar más repeticiones experimentales para poder confirmarlos con mayor seguridad.

A partir de los datos obtenidos (Tablas 3 y 4) para el cultivo de maíz y tomate, se evidenció que *Stenotrophomonas maltophilia* presentó una mayor uniformidad tanto en la germinación como en el desarrollo aéreo de las plántulas, mientras que *Delftia acidovorans* mostró una menor variabilidad en las variables asociadas a la biomasa. Estos comportamientos pueden observarse con mayor detalle en la Figura 4.



Figura 4. Ensayos de germinación de semillas de maíz y tomate bajo tratamientos bacterianos.

Fuente: Elaboración propia.

◆ EVALUACIÓN DE BACTERIAS ELECTROGÉNICAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SU RESPUESTA AL ESTRÉS POR PLOMO EN CONDICIONES EXPERIMENTALES

Complementariamente, el análisis de componentes principales (PCA) permitió visualizar la relación entre las variables evaluadas y los tratamientos. En el caso del maíz, se observó que *Stenotrophomonas maltophilia* se asoció con variables vinculadas al crecimiento aéreo, mientras que *Delftia acidovorans* se asoció con variables de biomasa y desarrollo radicular (Figura 5). En cuanto al tomate (Figura 6), se observó una separación entre los tratamientos bacterianos y el control, lo que sugiere diferencias en el comportamiento fisiológico de las plantas, tales como la cepa *Stenotrophomonas maltophilia* estimulo en la elongación foliar y *Delftia acidovorans* mostro influencia en el número de hojas.

Tabla 3. Tratamiento, medidas y resultados del maíz

TRATAMIE NTO	REPETICI ON	HOJ AS	ELONGACION DE LA HOJA (cm)	TALLO (cm)	RAIZ	DIAMETRO DE TALLO	PESO FRESCO	PESO SECO
	1	2,8	5,6	3,4	18, 5	2,2	4,6213	1,0438
A1-40	2	1,8	5,2	2,9	17, 0	2,6	5,573	1,1383
	3	3,0	6,7	4,0	15, 4	2,5	5,0032	0,9213
	1	3,0	8,3	2,5	23, 0	1,9	2,005	0,3957
C1-20	2	3,0	7,8	3,6	15, 4	2,2	4,3602	0,8165
	3	1,3	3,2	3,9	8,3	2,7	6,891	1,2143
	1	3,0	8,4	2,5	16, 8	2,1	2,2672	0,3903
BLANCO	2	3,0	7,8	3,6	15, 4	2,4	3,4102	0,8448
	3	1,3	3,2	2,0	6,2	1,5	4,7473	0,8202

Fuente: Elaboración propia.

◆ EVALUACIÓN DE BACTERIAS ELECTROGÉNICAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SU RESPUESTA AL ESTRÉS POR PLOMO EN CONDICIONES EXPERIMENTALES

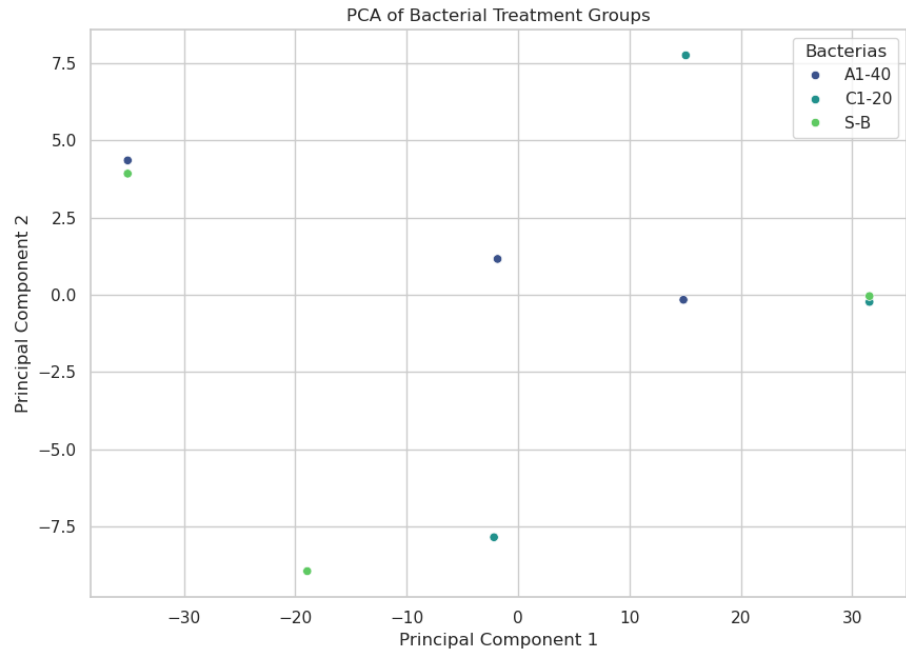


Figura 5: Análisis de componentes principales tratamientos con el maíz

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Tratamiento, medidas y resultados del tomate

TRATAMIE NTO	REPETICI ON	HOJ AS	ELONGACION DE LA HOJA (cm)	TALLO (cm)	RAI Z (c m)	PESO FRESCO (g)	PESO SECO (g)
A1-40	1	2,0	0,8	7,3	7,0	0,2459	0,0135
	2	2,0	0,9	7,2	4,2	0,1336	0,0093
	3	2,0	0,8	5,8	8,8	0,118	0,0111
C1-20	1	2,0	1,2	6,5	6,4	0,2068	0,0135
	2	2,0	0,9	5,9	7,3	0,1375	0,0158
	3	1,9	0,8	4,4	5,4	0,213	0,0113
BLANCO	1	2,2	0,7	6,7	7,2	0,1386	0,0115
	2	2,0	0,7	6,1	5,4	0,1256	0,0114
	3	2,2	0,6	5,8	6,7	0,1706	0,0115

Fuente: Elaboración propia.

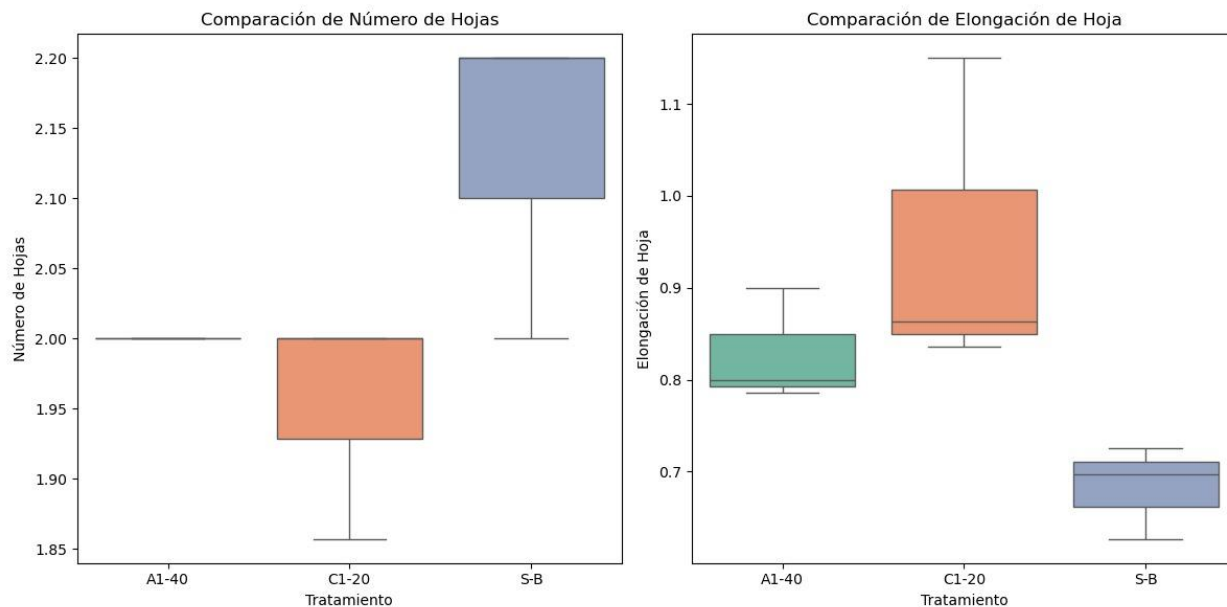


Figura 6: Análisis de componentes principales tratamientos con el Tomate

Fuente: Elaboración propia.

Tolerancia bacteriana al plomo

Los ensayos de tolerancia a plomo ambas cepas bacterianas mostraron una disminución en su crecimiento a medida que aumentó la concentración del metal en el medio de cultivo. El comportamiento descrito indica un efecto inhibitor del plomo sobre la actividad bacteriana.

A pesar de la inhibición dada, ambas cepas mantuvieron un crecimiento, lo que sugiere la existencia de mecanismos de tolerancia ante niveles más altos de exposición lo que permite la supervivencia de las bacterias bajo condiciones de estrés metálico. En concentraciones mayores *Delftia acidovorans* mostró una ligera mayor estabilidad, lo que podría estar relacionado con mecanismos de biosorción o bioacumulación descritos en estudios previos (2).

El análisis estadístico ANOVA factorial confirmó que la concentración de plomo tuvo un efecto significativo sobre el crecimiento bacteriano ($p < 0,05$), mientras que el tipo de bacteria y la interacción entre ambos factores no mostraron efectos significativos ($p > 0,05$). Esto demuestra que la variación en el crecimiento bacteriano estuvo determinada principalmente por la concentración del metal y no por diferencias intrínsecas entre las cepas.

De forma gráfica también se muestra esta misma tendencia, se da una disminución progresiva del crecimiento bacteriano a medida que incrementa la concentración de plomo y una superposición en los intervalos de confianza entre ambas bacterias. Estos resultados se presentan en la Tabla 5 y Figura 7.

◆ EVALUACIÓN DE BACTERIAS ELECTROGÉNICAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SU RESPUESTA AL ESTRÉS POR PLOMO EN CONDICIONES EXPERIMENTALES

Tabla 5. Cantidad de UFC/mL de las bacterias aisladas.

TRATAMIENTOS	METAL PESADO Tolerancia y toxicidad			
	0	0,5	1	1,5
A1-40	2,42E+06	1,05E+06	6,32E+05	8,16E+05
	4,67E+05	1,86E+06	9,60E+05	8,24E+05
	1,72E+06	1,43E+06	3,57E+05	7,89E+05
C1-20	2,75E+06	1,44E+06	9,78E+05	7,11E+05
	3,20E+06	1,49E+06	6,58E+05	8,59E+05
	7,68E+05	1,17E+06	1,02E+06	3,93E+05

Fuente: Elaboración propia.

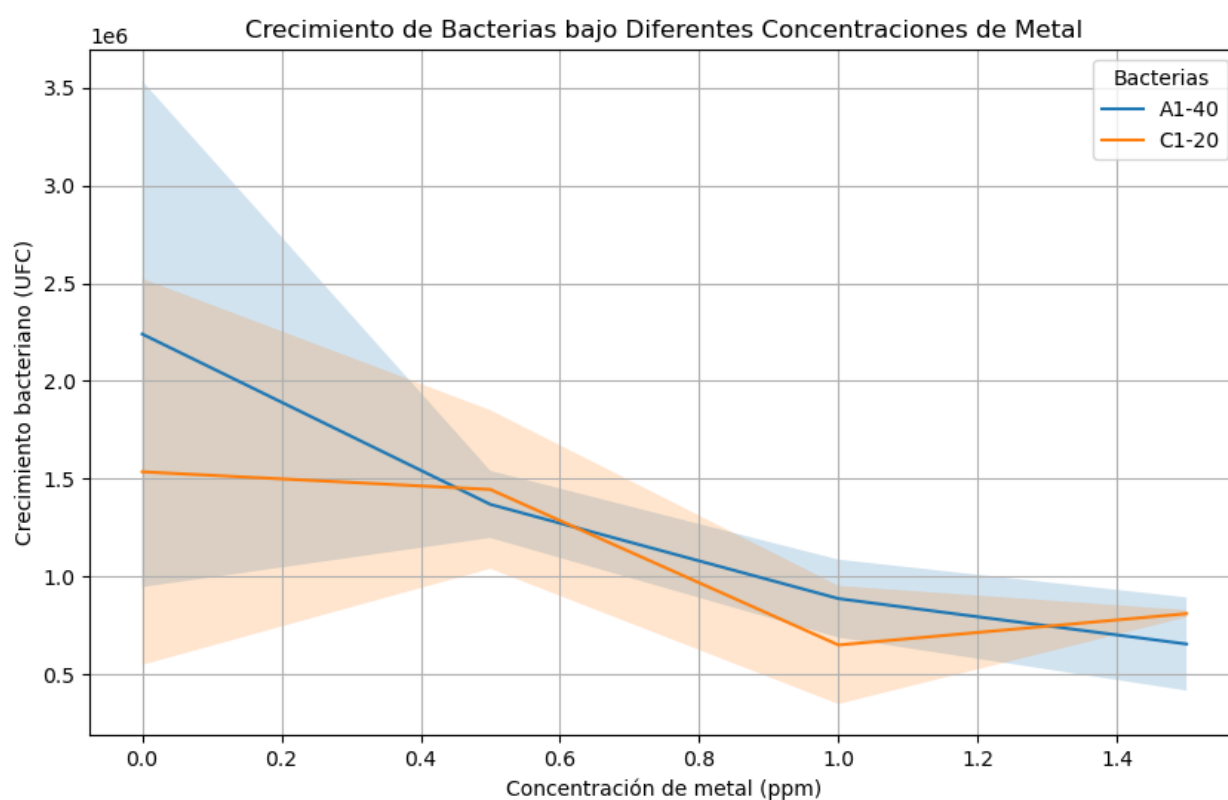


Figura 7. Crecimiento bacteriano bajo condiciones de estrés metálico

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que las bacterias electrogénicas identificadas como *Delftia acidovorans* y *Stenotrophomonas maltophilia* poseen características funcionales relevantes tanto para aplicaciones agrícolas como ambientales. La identificación molecular mediante secuenciación del gen 16S rADN permitió una clasificación taxonómica

confiable, coherente con lo reportado en estudios previos donde este marcador es ampliamente utilizado por su alta resolución en bacterias ambientales (16). La alta similitud de las secuencias con registros de bases de datos respalda la validez de los aislados utilizados en este estudio.

En cuanto a la caracterización metabólica, ambas cepas mostraron capacidad para producir ácido indolacético (IAA) y solubilizar fosfatos, lo que confirma su potencial como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB). La producción de IAA observada concuerda con lo descrito por Spaepen et al.³, quienes destacan que esta fitohormona desempeña un papel fundamental en la elongación celular y el desarrollo radicular. Mejores respuestas en la producción de IAA por parte de *D. acidovorans* sugiere una posible ventaja en la estimulación del crecimiento vegetal, lo cual se reflejó en los resultados de elongación de raíz y acumulación de biomasa. Sin embargo, hay que considerar que de existir alguna variación drástica en la concentración de esta auxina generaría un efecto negativo sobre el crecimiento a nivel vegetal (18). Es importante mencionar que las pruebas de IAA se realizaron en ausencia de metal pesado, se reporta (19) que la presencia de Pb u otros metales puede modificar temporalmente la producción de auxinas y alterar procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetal mediante un fenómeno conocido como hormesis, donde bajas concentraciones del metal inducen respuestas adaptativas antes de alcanzar niveles tóxicos. Asimismo, la presencia de plomo u otro metal puede influir en la intensidad del color al usar el reactivo de Salkowski, debido a que los metales pesados pueden interferir tanto en la producción de compuestos indólicos como en las reacciones colorimétricas utilizadas para su detección. Por ello, el cambio en la tonalidad no necesariamente reflejaría una variación en la producción de IAA, sino también posibles interferencias a nivel químico causadas por el Pb.

Asimismo, la solubilización de fosfatos observada en ambas bacterias coincide con lo reportado por Rodríguez & Fraga (7), quienes señalan que este mecanismo incrementa la disponibilidad de fósforo en el suelo, favoreciendo la nutrición vegetal, especialmente en sistemas agrícolas con baja fertilidad.

En los ensayos de germinación, aunque no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$), se observaron tendencias biológicas importantes. *Stenotrophomonas maltophilia* mostró un mejor desempeño en la germinación y desarrollo de la parte aérea, mientras que *Delftia acidovorans* destacó en el desarrollo radicular y acumulación de biomasa. Estos resultados son consistentes con estudios como el de Gopi et al. (12), quienes reportan el potencial de *S. maltophilia* como promotora del crecimiento vegetal y agente de biocontrol, así como con Woźniak et al. (20), quienes documentan efectos positivos de bacterias rizosféricas en el desarrollo temprano de cultivos.

La falta de significancia estadística en las variables evaluadas podría estar asociada al tamaño muestral limitado, lo cual reduce la potencia estadística del análisis, una condición común en estudios experimentales a escala de laboratorio. Sin embargo, los análisis exploratorios, incluyendo diagramas de caja y análisis de componentes principales (PCA), permitieron identificar patrones diferenciados en la respuesta vegetal. Este tipo de análisis complementario ha sido recomendado en estudios biológicos para detectar tendencias no evidentes en pruebas estadísticas tradicionales (21).

En el parte ambiental, ambas cepas bacterianas mostraron una tolerancia a diversas concentraciones de plomo, mostrando una disminución progresiva de su crecimiento con el incremento de la concentración del metal, lo cual concuerda con el efecto inhibitor de los metales pesados sobre microorganismos (22). No obstante, la prueba estadística ANOVA factorial indicó que la concentración de plomo tuvo un efecto significativo en el crecimiento bacteriano ($p < 0,05$), mientras que el tipo de bacteria y la interacción entre ambos factores no mostraron diferencias significativas. Este comportamiento de las cepas sugiere que, aunque ambas bacterias responden de manera similar al estrés metálico, poseen mecanismos de tolerancia que les permiten sobrevivir bajo condiciones de estrés metálico, bajo las condiciones del ensayo las dosis usadas no alcanzan los umbrales letales o que el tiempo de exposición a nivel experimental no fue suficiente para evidenciar cambios fenotípicos más severos en las especies. Diversos estudios señalan que bajas concentraciones como de Pb estimulan temporalmente ciertos procesos fisiológicos y metabólicos antes de generar toxicidad, la hormesis.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Lin et al. (11), quienes destacan que *Stenotrophomonas maltophilia* posee sistemas de eflujo y capacidad de formación de biopelículas que contribuyen a la resistencia a metales pesados. Por su parte, *Delftia acidovorans* ha sido asociada con procesos de biosorción y bioacumulación de metales mediante compuestos extracelulares (10), disminuyendo así su toxicidad lo que podría explicar su ligera ventaja en condiciones de mayor concentración de plomo observada en este estudio.

A pesar de la reducción en el crecimiento bacteriano bajo estrés metálico, ninguna de las cepas presentó una inhibición total, lo que indica la presencia de mecanismos adaptativos que permiten su supervivencia. Este aspecto es relevante desde el punto de vista de la biorremediación, ya que la persistencia microbiana es un requisito fundamental para la aplicación en ambientes contaminados (23).

En conjunto, los resultados de la evaluación morfológica y de tolerancia confirman un potencial de las bacterias identificadas como bioestimulantes y agentes aplicables a la biorremediación, independiente de la menor significancia encontrada en las pruebas univariadas realizadas. La combinación de sus capacidades metabólicas y su tolerancia a metales pesados nos proporciona información para considerarlas como promotoras de la recuperación de suelos contaminados. Sin embargo, es necesario validar estos mecanismos de adaptación y efectos en estudios a mayor escala y bajo condiciones de campo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación indican que las cepas bacterianas *Delftia acidovorans* y *Stenotrophomonas maltophilia*, identificadas mediante secuenciación del gen 16S rADN muestran características funcionales favorables para su aplicación biotecnológica. Ambas bacterias demostraron capacidad para producir ácido indolacético (IAA) y solubilizar fosfatos siendo estas propiedades claves asociadas a microorganismos promotores de crecimiento vegetal. Las capacidades metabólicas evidenciaron respuestas positivas en los ensayos de germinación y desarrollo inicial de plántulas de maíz y tomate, donde observaron mejoras en

variables como elongación radicular, desarrollo foliar y acumulación de biomasa, aunque sin diferencias significativas a nivel estadístico entre tratamientos.

En cuanto a las respuestas específicas, *Stenotrophomonas maltophilia* se relaciona con un mayor desarrollo de la parte aérea de las plantas, mientras que *Delftia acidovorans* presentó un mayor efecto en el crecimiento radicular y en el incremento de peso seco, lo que sugiere posibles mecanismos de acción complementarios que pueden ser aprovechados en aplicaciones conjuntas con otros organismos benéficos. A pesar de la ausencia de significancia estadística en el análisis de varianza dentro de las pruebas de promotoras de crecimiento, los análisis exploratorios y multivariados evidenciaron patrones biológicos consistentes que apoyan el potencial como bioestimulantes de ambas cepas en etapas tempranas del desarrollo vegetal.

En referencia a la tolerancia al plomo las dos bacterias estudiadas a nivel experimental mantuvieron un crecimiento a medida que aumentaba la concentración del metal, aunque con una reducción progresiva, siendo éste el único efecto estadísticamente significativo. No obstante, la persistencia del crecimiento bacteriano en todas las concentraciones evaluadas sugiere la presencia de mecanismos adaptativos que permiten su supervivencia en condiciones adversas. En conjunto, los resultados sugieren que, pese a no evidenciar una influencia estadísticamente significativa en todas las variables analizadas, las respuestas fisiológicas observadas la aplicación de las cepas podrían ser consideradas com estrategias de bioestimulación vegetal y biorremediación de suelos contaminados, recomendándose su evaluación futura en condiciones de campo y en consorcios microbianos con el fin de mejorar su eficacia.

AGRADECIMIENTOS (OPCIONAL)

Los autores expresan su agradecimiento al Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC-ESPOCH) por la gestión institucional y el acceso a infraestructura y laboratorios, lo cual permitió el desarrollo experimental de la presente investigación.

DECLARACIÓN DE INTERÉS (OPCIONAL)

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés de ningún tipo que puedan haber influido en el desarrollo, análisis o publicación de los resultados presentados en este estudio.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR (OPCIONAL)

Chalán, M. A. participó en la conceptualización del estudio, diseño metodológico, ejecución experimental, recolección y análisis de datos, así como en la redacción del borrador original del manuscrito. Guambo-Galarza, A. contribuyó en la supervisión de la investigación, validación metodológica, análisis e interpretación de resultados y revisión crítica del contenido. Lagla-Molina, M. participó en el análisis estadístico, interpretación de resultados y revisión del manuscrito. Orejuela-Romero, J. A. participó en el apoyo técnico durante la fase experimental, revisión bibliográfica y revisión crítica del manuscrito para fortalecer la interpretación científica de los resultados. Erazo, N. contribuyó en la validación metodológica, revisión crítica del contenido y seguimiento del desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ramakrishnan S, Muruganraj T, Majumdar R, Sugumar S. Study of Cadmium Metal Resistance in *Stenotrophomonas maltophilia*. *Indian J Microbiol*. 2023;63(1).
2. Amer A, Kim Y. Isolation of Pb(II)-reducing bacteria and demonstration of biological Pb(II) reduction to metallic Pb. *J Hazard Mater*. 2022;423:126975. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389421019439?via%3Dihub>
3. Spaepen S, Vanderleyden J, Remans R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiol Rev*. 2007 Jul;31(4):425–48.
4. Ahmad F, Ahmad I, Khan MS. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiol Res*. 2008 Mar;163(2):173–81.
5. Márquez R, Blanco EL, Aranguren Y. *Bacillus* strain selection with plant growth-promoting mechanisms as potential elicitors of systemic resistance to gray mold in pepper plants. *Saudi J Biol Sci*. 2020 Aug;27(8):1913–22.
6. Patten CL, Glick BR. Role of *Pseudomonas putida* Indoleacetic Acid in Development of the Host Plant Root System. *Appl Environ Microbiol*. 2002 Aug;68(8):3795–801.
7. Rodríguez H, Fraga R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnol Adv*. 1999 Oct 1 [cited 2025 Jun 24];17(4–5):319–39. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975099000142?via%3Dihub>
8. Alori ET, Glick BR, Babalola OO. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. *Front Microbiol*. 2017 Jun 2;8.
9. Timofeeva A, Galyamova M, Sedykh S. Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. *Plants*. 2022 Aug 15;11(16):2119.
10. Mukherjee P, Roy P. Genomic Potential of *Stenotrophomonas maltophilia* in Bioremediation with an Assessment of Its Multifaceted Role in Our Environment. *Front Microbiol*. 2016 Jun 22;7:1–14. Available from: <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fmicb.2016.00967/abstract>
11. Lin YT, Huang YW, Liou RS, Chang YC, Yang TC. MacABCsm, an ABC-type tripartite efflux pump of *Stenotrophomonas maltophilia* involved in drug resistance, oxidative and envelope stress tolerances and biofilm formation. *J Antimicrob Chemother*. 2014 Dec 1;69(12):3221–6.
12. Gopi K, Jinal HN, Pritesh P, Kartik VP, Amaresan N. Effect of copper-resistant *Stenotrophomonas maltophilia* on maize (*Zea mays*) growth, physiological properties, and copper accumulation: potential for phytoremediation into biofortification. *Int J Phytoremediation*. 2020 May 11;22(6):662–8.
13. Lovley DR. Electromicrobiology. *Annu Rev Microbiol*. 2012;66.
14. Ashkan MF. Lead: Natural Occurrence, Toxicity to Organisms and Bioremediation by Lead-degrading Bacteria: A Comprehensive Review. *J Pure Appl Microbiol*. 2023 Sep 1;17(3):1298–319.
15. Zakharova EA, Shcherbakov AA, Brudnik V V., Skripko NG, Bulkhin NS, Ignatov V V. Biosynthesis of indole-3-acetic acid in *Azospirillum brasilense*. *Eur J Biochem*. 1999 Feb

- 25;259(3):572–6.
16. Clarridge JE. Impact of 16S rRNA Gene Sequence Analysis for Identification of Bacteria on Clinical Microbiology and Infectious Diseases. *Clin Microbiol Rev.* 2004 Oct;17(4):840–62. Available from: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/CMR.17.4.840-862.2004>
17. Sultana F, Motaher Hossain M. Assessing the potentials of bacterial antagonists for plant growth promotion, nutrient acquisition, and biological control of Southern blight disease in tomato. *PLoS One.* 2022 Jun 1;17(6 June).
18. Sytar O, Kumari P, Yadav S, Brestic M, Rastogi A. Phytohormone Priming: Regulator for Heavy Metal Stress in Plants. *J Plant Growth Regul.* 2019 Jun 27;38(2):739–52. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00344-018-9886-8>
19. Małkowski E, Sitko K, Szopiński M, Gieroń Ż, Pogrzeba M, Kalaji HM, et al. Hormesis in Plants: The Role of Oxidative Stress, Auxins and Photosynthesis in Corn Treated with Cd or Pb. *Int J Mol Sci.* 2020 Mar 19;21(6):2099.
20. Woźniak M, Gałązka A, Tyśkiewicz R, Jaroszek-Ścisł J. Endophytic Bacteria Potentially Promote Plant Growth by Synthesizing Different Metabolites and their Phenotypic/Physiological Profiles in the Biolog GEN III MicroPlate™ Test. *Int J Mol Sci.* 2019 Oct 24;20(21):5283.
21. Jolliffe IT. Principal Component Analysis. 2nd ed. Springer-Verlag, editor. New York: Springer New York, NY; 2002. 488 p.
22. Nies DH. Microbial heavy-metal resistance. *Appl Microbiol Biotechnol.* 1999 Jun 22;51(6):730–50. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s002530051457>
23. Gadd GM. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology.* 2010 Mar 1;156(3):609–43. Available from: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.037143-0>