

# Lead recovery in artificially contaminated agricultural soil as a remediation strategy using sunflower and vermicompost

## Recuperación de plomo en suelo agrícola contaminado artificialmente como estrategia de remediación mediante girasol y vermicompost

Guido Sarmiento-Sarmiento\* & Shadai Febres-Flores

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Av. Independencia s/n, Cercado, Arequipa, C. P. 04001, PERÚ.

\*Corresponding author: gsarmientos@unsa.edu.pe, tel. +51 959 82 65 65.

### Abstract

Lead (Pb) contamination is an environmental problem that deteriorates the quality of agricultural soils; therefore, it is a priority to evaluate remediation strategies for its recovery. The aim of this research was to evaluate the effect of sunflower (*Helianthus annuus*) and vermicompost in the remediation of agricultural soils artificially contaminated with Pb. The treatments studied were: T1 (soil with Pb, vermicompost and sunflower), T2 (soil with Pb and vermicompost), T3 (soil with Pb and sunflower) and T4 (soil with Pb). The initial Pb value in the soil was 16.05 ppm, and 105 ppm Pb were added by dissolving  $Pb(NO_3)_2$ , reaching a concentration of 121.05 ppm as the initial level, higher than the national environmental quality standard (EQS) for agricultural soils (70 ppm Pb). All treatments reduced the Pb concentration in the soil below the EQS. T2 stood out by achieving a Pb recovery of 81.21 %. The Pb bioconcentration factor (BF) in the aerial part and roots of sunflower plants (T1 and T3) registered values of less than one, acting as an exclusive plant species. According to the Pb translocation factor (TF), sunflower in the presence of vermicompost (T1) behaved as a Pb phytostabilizing plant ( $TF < 1$ ), and in the absence of vermicompost (T3) it proved to be a Pb phytoextractor ( $TF > 1$ ).

**Keywords:** lead removal, bioconcentration, translocation, *Helianthus annuus*.

### Resumen

La contaminación con plomo (Pb) es un problema ambiental que deteriora la calidad de suelos agrícolas; por ello, es prioritario evaluar estrategias de remediación para su recuperación. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del girasol (*Helianthus annuus*) y el vermicompost en la remediación de suelos agrícolas contaminados artificialmente con Pb. Los tratamientos estudiados fueron: T1 (suelo con Pb, vermicompost y girasol), T2 (suelo con Pb y vermicompost), T3 (suelo con Pb y girasol) y T4 (suelo con Pb). El valor inicial de Pb en el suelo era de 16.05 ppm, y se agregaron 105 ppm de Pb mediante una disolución de  $Pb(NO_3)_2$ , alcanzando una concentración de 121.05 ppm como nivel inicial, superior al estándar de calidad ambiental (ECA) nacional para suelos agrícolas (70 ppm de Pb). Todos los tratamientos redujeron la concentración de Pb en el suelo por debajo del ECA. El T2 destacó al lograr una recuperación de Pb de 81.21 %. El factor de bioconcentración de Pb (FB) en la parte aérea y raíces de las plantas de girasol (T1 y T3) registró valores menores a uno, desempeñándose como una especie vegetal exclusora. Según el factor de traslocación de Pb (FT), el girasol en presencia de vermicompost (T1) se comportó como una planta fitoestabilizadora de Pb ( $FT < 1$ ), y en ausencia de vermicompost (T3) demostró ser fitoextractora de Pb ( $FT > 1$ ).

**Palabras clave:** remoción de plomo, bioconcentración, traslocación, *Helianthus annuus*.



## Introduction

The concentration of heavy elements in the atmosphere, and their subsequent precipitation in the soil, is a situation of concern for the environment and the health of the population (Liu et al., 2020). Lead (Pb) contamination of agricultural soils is a problem caused mainly by anthropogenic activities (Zia, Rizwan, Ali, Sabir, & Sohail, 2017), such as poor quality gasoline combustion, paint manufacturing, metallic lead in smelting, mining, and battery recycling, among others. Pb is an element that is concentrated in the soil, being a basic element it does not degrade, and at excessive levels it is detrimental to the soil, causing the loss of its functions (Astete et al., 2009).

The environmental risk posed by Pb in the soil is related to its bioavailability (Hettiarachchi & Pierzynski, 2004), with dust being its main pathway through which it concentrates and enters organisms. Even due to the action of the wind and human activity, Pb particles can be re-suspended in the air and settle in the soil (Jiménez, Navarro, Gómez, & Almendro, 2017). The distribution of Pb in the soil depends on its properties, such as texture, organic matter, pH, cation exchange capacity, type of clay and porosity; in addition, it depends on the qualities of Pb-containing compounds (Hettiarachchi & Pierzynski, 2004; Karande et al., 2019).

The recovery of Pb from the soil must be environmentally managed through appropriate remediation technologies. Currently, there are several technologies based on biological, physicochemical or thermal processes to contain, isolate or eliminate contaminants (Ortiz-Bernad, Sanz-García, Dorado-Valiño, & Villar-Fernández, 2007; Volke-Sepúlveda & Velasco-Trejo, 2002). Phytoremediation is an innovative and environmentally friendly technology that can be used on a large scale. This technology is based on the ability of some plants to accumulate, capture, metabolize, degrade, stabilize or eliminate contaminants (Delgadillo-López, González-Ramírez, Prieto-García, Villagómez-Ibarra, & Acevedo-Sandoval, 2011; Gerhardt, Huang, Glick, & Greenberg, 2009; Hazrat, Ezzat, & Muhammad, 2013).

Several studies report that sunflower (*Helianthus annuus*) can recover Pb from the soil by behaving as a Pb accumulator plant, since it has the ability to stabilize and concentrate it in leaf tissues and roots. This plant has been widely recommended for use in remediation processes of Pb-contaminated soils (Ahmadreza, Seyed, Seyed, Fatemed, & Zainab, 2020; Gómez et al., 2018; Moslehi, Feizian, Higuera, & Eisvand, 2019; Munive et al., 2020; Nehnevajova, Herzig, Federer, Erismann, & Schwitzguébel, 2005; Ortiz-Cano et al., 2009; Zhao, Joo, Lee, & Kim, 2019).

## Introducción

La concentración de elementos pesados en la atmósfera, y su posterior precipitación en el suelo, es una situación preocupante para el medio ambiente y la salud de la población (Liu et al., 2020). La contaminación de suelos agrícolas con plomo (Pb) es un problema ocasionado, principalmente, por actividades antropogénicas (Zia, Rizwan, Ali, Sabir, & Sohail, 2017), como la combustión de gasolina de mala calidad, fabricación de pintura, plomo metálico en la fundición, minería, reciclaje de baterías, entre otros. El Pb es un elemento que se concentra en el suelo, por ser un elemento básico no se degrada, y en niveles excesivos es perjudicial para el suelo, lo cual ocasiona la pérdida de sus funciones (Astete et al., 2009).

El riesgo ambiental del Pb en el suelo está relacionado con su biodisponibilidad (Hettiarachchi & Pierzynski, 2004), siendo el polvo su principal vía y mediante el cual se concentra e ingresa a los organismos. Inclusive, por acción del viento y la actividad humana, las partículas de Pb pueden ser nuevamente suspendidas en el aire y sedimentarse en los suelos (Jiménez, Navarro, Gómez, & Almendro, 2017). La distribución de Pb en el suelo depende de sus propiedades, como textura, materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, tipo de arcilla y porosidad; además, depende de las cualidades de compuestos que contienen Pb (Hettiarachchi & Pierzynski, 2004; Karande et al., 2019).

La recuperación de Pb del suelo debe ser gestionada ambientalmente mediante tecnologías de remediación apropiadas. Actualmente, existen varias tecnologías basadas en procesos biológicos, fisicoquímicos o térmicos para contener, aislar o eliminar contaminantes (Ortiz-Bernad, Sanz-García, Dorado-Valiño, & Villar-Fernández, 2007; Volke-Sepúlveda & Velasco-Trejo, 2002). La fitorremediación es una tecnología innovadora y amigable con el ambiente que se puede emplear a gran escala. Esta tecnología se fundamenta en la capacidad de algunas plantas para acumular, captar, metabolizar, degradar, estabilizar o eliminar contaminantes (Delgadillo-López, González-Ramírez, Prieto-García, Villagómez-Ibarra, & Acevedo-Sandoval, 2011; Gerhardt, Huang, Glick, & Greenberg, 2009; Hazrat, Ezzat, & Muhammad, 2013).

Varias investigaciones reportan que el girasol (*Helianthus annuus*) puede recuperar el Pb del suelo al comportarse como una planta acumuladora de Pb, ya que tiene la capacidad de estabilizarlo y concentrarlo en tejidos foliares y raíces. Esta planta ha sido ampliamente recomendada para su uso en procesos de remediación de suelos contaminados por dicho elemento (Ahmadreza, Seyed, Seyed, Fatemed, & Zainab, 2020; Gómez et al., 2018; Moslehi, Feizian, Higuera, &

The importance of adding vermicompost in remediation processes of Pb-contaminated soils is mainly because it acts as a soil conditioner or amendment by facilitating the removal of the contaminant (Moslehi et al., 2019; Munive et al., 2020; Rubenacker, Campitelli, Sereno, & Ceppi, 2011; Tognetti, Laos, Mazzarino, & Hernández, 2005; Zhang et al., 2019).

Currently, in several Latin American cities (among them Arequipa, Peru), industrial development and the vehicle fleet, which consumes low-quality fuel, have increased the emission of toxic gases into the environment. These gases, with Pb particles, precipitate in agricultural soils, which generates a potential contamination problem. Thus, the recovery of Pb from a contaminated soil using sunflower and vermicompost is an important strategy for soil remediation. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of sunflower and vermicompost in the remediation of agricultural soils artificially contaminated with Pb.

## Materials and methods

### Germination and phytotoxicity test on sunflower seeds

The sunflower seed germination test was conducted at the Agro-environmental Management Laboratory belonging to the Faculty of Agronomy of the National University of San Agustín de Arequipa – Peru (LGA-UNSA). To determine their viability, 10 seeds were deposited on a plastic tray with absorbent paper (Dos-Santos et al., 2017). The test was performed in triplicate, and each tray was irrigated with water. The number of germinated seeds was recorded after 10 days, and the results were expressed as a percentage of germinated seeds.

The phytotoxicity test on sunflower seeds was carried out in the same laboratory to verify their viability when exposed to Pb solutions at concentrations of 35, 70 and 105 ppm applied by irrigation. A  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  solution was used as a Pb source to define the most appropriate concentration for the treatments. In this test, Pb levels were related to the environmental quality standards (EQSs) for agricultural soils established in the Peruvian regulations (Ministerio del Ambiente del Perú [MINAM], 2017). For the test, 10 sunflower seeds were deposited in a plastic tray with absorbent paper (Dos-Santos et al., 2017) and the corresponding Pb dilution. The test was carried out in triplicate for each concentration.

### Initial soil and vermicompost analysis

The agricultural soil exposed to remediation was collected on land adjacent to an area of high vehicular traffic called the Arequipa-Peru bypass road (UTM

Eisvand, 2019; Munive et al., 2020; Nehnevajova, Herzig, Federer, Erismann, & Schwitzguébel, 2005; Ortiz-Cano et al., 2009; Zhao, Joo, Lee, & Kim, 2019).

La importancia de agregar vermicompost en procesos de remediación de suelos contaminados con Pb se debe, principalmente, a que actúa como acondicionador o enmienda de suelos al facilitar la extracción del contaminante (Moslehi et al., 2019; Munive et al., 2020; Rubenacker, Campitelli, Sereno, & Ceppi, 2011; Tognetti, Laos, Mazzarino, & Hernández, 2005; Zhang et al., 2019).

Actualmente, en varias ciudades de Latinoamérica (entre ellas Arequipa, Perú), el desarrollo industrial y el parque vehicular, que consume combustible de baja calidad, han incrementado la emisión de gases tóxicos al ambiente. Estos gases, con partículas de Pb, se precipitan en suelos agrícolas, lo cual genera un problema potencial de contaminación. Así, la recuperación de Pb de un suelo contaminado mediante el uso de girasol y vermicompost constituye una estrategia importante para la remediación de suelos. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del girasol y el vermicompost en la remediación de suelos agrícolas contaminados artificialmente con Pb.

## Materiales y métodos

### Prueba de germinación y fitotoxicidad en semillas de girasol

El ensayo de germinación de semillas de girasol se realizó en el Laboratorio de Gestión Agroambiental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa - Perú (LGA-UNSA). Para determinar su viabilidad, se depositaron 10 semillas sobre una bandeja de plástico con papel absorbente (Dos-Santos et al., 2017). El ensayo se realizó por triplicado, y cada bandeja se regó con agua. El número de semillas germinadas se registró a los 10 días, y los resultados se expresaron en porcentaje de semillas germinadas.

La prueba de fitotoxicidad en las semillas de girasol se efectuó en el mismo laboratorio, y se realizó con la finalidad de verificar su viabilidad al ser expuestas a soluciones de Pb en concentraciones de 35, 70 y 105 ppm aplicadas mediante riego. Como fuente de Pb se utilizó una disolución de  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  para definir la concentración más apropiada para los tratamientos. En esta prueba, los niveles de Pb estuvieron relacionados con los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos agrícolas establecidos en la normativa de Perú (Ministerio del Ambiente del Perú [MINAM], 2017). Para la prueba, se depositaron 10 semillas de girasol en una bandeja de plástico con papel absorbente (Dos-Santos et al., 2017) y la disolución de Pb correspondiente. El ensayo se realizó por triplicado por cada concentración.

WGS-84 North and East coordinates of 8188920 and 223859, respectively). The Pb concentration in the initial soil sample was obtained at the UNSA Research and Services Laboratory (LABINVSERV) with an atomic absorption spectrophotometer (Analyst™ 300, Perkin Elmer®). Complementary properties of the soil sample and vermicompost were determined at the Soil, Water and Seed Analysis Laboratory of the Agricultural Experimental Station (LAS-EEA-INIA, Arequipa) using the methodologies proposed by Bazán-Tapia (2017): Walkley-Black (organic matter), potentiometer (pH), conductometer (electrical conductivity [EC]), saturation with ammonium acetate (cation exchange capacity [CEC]), micro Kjeldahl (total N), modified Olsen (available P) and spectrophotometry (exchangeable K). The sand, silt and clay particles in the soil were determined with a hydrometer, texture was obtained with the textural triangle, and bulk density was determined by relating dry mass and soil volume (Bazán-Tapia, 2017).

### Research development

The study was carried out in the plant propagation greenhouse belonging to the UNSA's Faculty of Agronomy. For this, 12 pots were used, each containing 5 kg of agricultural soil contaminated with 105 ppm Pb in the form of  $Pb(NO_3)_2$ . This concentration was determined from the phytotoxicity test. The Pb solution was applied by localized irrigation, with an incubation period of 15 days. The incorporation of vermicompost was 0.25 kg for each treatment (5 % based on the weight of the agricultural soil). Subsequently, three sunflower seeds were placed per treatment. During the development of the sunflower plant, directed irrigation was applied and a container was installed to collect the leachate from the drainage.

The treatments studied were: T1 (soil with Pb, vermicompost and sunflower), T2 (soil with Pb and vermicompost), T3 (soil with Pb and sunflower) and T4 (soil with Pb).

### Evaluations

#### *Determination of lead in soil*

To determine the Pb concentration at the end of the remediation process, a soil sample was obtained for each treatment and replicate. Data were expressed in ppm and corresponded to the Pb remaining in the soil after the remediation process. The recovered (removed) Pb was calculated in ppm by means of the difference between the initial Pb and the remaining Pb, and the recovery efficiency (RE, %) was obtained by dividing the recovered Pb by the initial Pb and the result was multiplied by 100.

### Análisis inicial de suelo y vermicompost

El suelo agrícola expuesto a remediación se recolectó en terrenos adyacentes a una zona de alto tránsito vehicular denominada vía de evitamiento de Arequipa - Perú (coordenadas UTM WGS-84 Norte: 8188920 y Este: 223859). La concentración de Pb en la muestra inicial de suelo se obtuvo en el Laboratorio de Investigación y Servicios (LABINVSERV) de la UNSA con un espectrofotómetro de absorción atómica (Analyst™ 300, Perkin Elmer®). Las propiedades complementarias de la muestra de suelo y el análisis del vermicompost se determinaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Semillas de la Estación Experimental Agraria (LAS-EEA-INIA, Arequipa) a partir de las metodologías propuestas por Bazán-Tapia (2017): Walkley-Black (materia orgánica), potenciómetro (pH), conductímetro (conductividad eléctrica [CE]), saturación con acetato de amonio (capacidad de intercambio catiónico [CIC]), micro Kjeldahl (N total), olsen modificado (P disponible) y espectrofotometría (K cambiante). Las partículas de arena, limo y arcilla en el suelo se determinaron con un hidrómetro, la textura se obtuvo con el triángulo textural, y la densidad aparente se determinó relacionando la masa seca y volumen de suelo (Bazán-Tapia, 2017).

### Desarrollo de la investigación

El estudio se llevó a cabo en el invernadero de propagación de plantas de la Facultad de Agronomía de la UNSA. Para ello, se utilizaron 12 macetas, cada una con 5 kg de suelo agrícola contaminado con 105 ppm de Pb en forma de  $Pb(NO_3)_2$ . Dicha concentración se determinó a partir de la prueba de fitotoxicidad. La solución de Pb se aplicó mediante riego localizado, con un periodo de incubación de 15 días. La incorporación de vermicompost fue de 0.25 kg por cada tratamiento (5 % con base al peso del suelo agrícola). Posteriormente, se colocaron tres semillas de girasol por tratamiento. Durante el desarrollo de la planta de girasol, se aplicó riego dirigido y se instaló un recipiente para coleccionar los lixiviados del drenaje.

Los tratamientos estudiados fueron: T1 (suelo con Pb, vermicompost y girasol), T2 (suelo con Pb y vermicompost), T3 (suelo con Pb y girasol) y T4 (suelo con Pb).

### Evaluaciones

#### *Determinación de plomo en el suelo*

Para determinar la concentración de Pb al final del proceso de remediación, se obtuvo una muestra de suelo por cada tratamiento y repetición. Los datos se expresaron en ppm y correspondían al Pb remanente



### **Determination of lead in sunflower plants**

The analysis of Pb in sunflower plants (T1 and T3) was performed on separate root and aerial part (stems and leaves) samples at the end of the remediation process. The analysis was carried out at LABINVSERV by atomic absorption. Results were expressed in ppm.

The bioconcentration factor (BF) was obtained by dividing the Pb content in the roots or aerial part of the plant by the Pb content of the soil (Audet & Charest, 2007; Deng, Ye, & Wong, 2004). The translocation factor (TF) resulted from the Pb content in the aerial part of the plant divided by the Pb content in the roots (Audet & Charest, 2007; Deng et al., 2004). The study ended 100 days after the experimental setup, a period in which the sunflower plant had not yet developed its inflorescence.

### **Statistical analysis**

To study the effect of sunflower and vermicompost on Pb recovery in an artificially contaminated agricultural soil, a completely randomized experimental design with four treatments and three replicates was established, which generated twelve experimental units. The experimental unit was a pot with contaminated soil. The values obtained were subjected to an analysis of variance and a Tukeys mean comparison test ( $P \leq 0.05$ ). Statistical analyses were performed with the SPSS version 22 software (International Business Machines [IBM], 2013).

## **Results and discussion**

### **Sunflower seed germination**

After 10 days,  $96.7 \pm 0.47$  % germination was obtained in sunflower seeds, which demonstrated their high viability to continue their development. A germinated seed was considered when there was a radicle present with a minimum length of 2 mm. According to Dos-Santos et al. (2017), sunflower seed germination starts 4 days after sowing and ends at 13 days, as happened in this research. At 15 days, all seeds had germinated.

### **Phytotoxicity in sunflower seeds**

The phytotoxicity test was carried out to determine seed tolerance to Pb (35, 70 and 105 ppm). Pb tolerance was determined by the ability of the seeds to germinate. Results showed a high germination percentage (90 %) at 10 days, even at the highest Pb concentration (105 ppm) (Table 1). At all Pb levels, 100 % germination was achieved at 15 days. These results allowed choosing the 105 ppm Pb dose for application to the soil as part of the treatments.

del suelo después del proceso de remediación. Se calculó el Pb recuperado (removido) en ppm mediante la diferencia del Pb inicial y el Pb remanente, y la eficiencia de recuperación (ER, %) se obtuvo dividiendo el Pb recuperado entre el Pb inicial y el resultado se multiplicó por 100.

### **Determinación de plomo en las plantas de girasol**

El análisis de Pb en las plantas de girasol (T1 y T3) se realizó en muestras separadas de raíces y parte aérea (tallos y hojas) al final de proceso de remediación. El análisis se realizó en el LABINVSERV mediante absorción atómica. Los resultados se expresaron en ppm.

El factor de bioconcentración (FB) se obtuvo al dividir el contenido de Pb en las raíces o en la parte aérea de la planta entre el contenido Pb del suelo (Audet & Charest, 2007; Deng, Ye, & Wong, 2004). Por su parte, el factor de traslocación (FT) resultó del contenido de Pb en la parte aérea de la planta dividido entre el contenido de Pb en las raíces (Audet & Charest, 2007; Deng et al., 2004). El estudio culminó a los 100 días de la instalación del experimento, periodo en el cual la planta de girasol aún no desarrolló su inflorescencia.

### **Análisis estadístico**

Para estudiar el efecto del girasol y el vermicompost en la recuperación de Pb en un suelo agrícola contaminado artificialmente, se estableció un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones, lo cual generó doce unidades experimentales. La unidad experimental fue una maceta con suelo contaminado. Los valores obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS versión 22 (International Business Machines [IBM], 2013).

## **Resultados y discusión**

### **Germinación de semillas de girasol**

Después de 10 días, se obtuvo el  $96.7 \pm 0.47$  % de germinación en las semillas de girasol, lo cual demostró su alta viabilidad para continuar su desarrollo. Se consideró una semilla germinada cuando hubo presencia de radícula con una longitud mínima de 2 mm. De acuerdo con Dos-Santos et al. (2017), la germinación de semillas de girasol inicia 4 días después de la siembra y termina a los 13 días, tal como sucedió en esta investigación. A los 15 días, todas las semillas habían germinado.

**Table 1. Phytotoxicity in sunflower seeds under different concentrations of lead (Pb) at 10 days after sowing.****Cuadro 1. Fitotoxicidad en semillas de girasol bajo diferentes concentraciones de plomo (Pb) a los 10 días de la siembra.**

Replicates/ Repeticiones	35 ppm		70 ppm		105 ppm	
	NGS/ NSG	Germination (%)/ Germinación (%)	NGS/ NSG	Germination (%)/ Germinación (%)	NGS/ NSG	Germination (%)/ Germinación (%)
R1	9	90	8	80	9	90
R2	8	80	9	90	8	80
R3	9	90	9	90	10	100
Average/Promedio	8.7	86.6	8.7	86.6	9	90
SD/DS	0.471	-	0.471	-	0.816	-

NGS = number of germinated seeds; SD = standard deviation.

NSG = número de semillas germinadas; DS = desviación estandar.

According to the phytotoxicity results, 105 ppm did not affect sunflower seed germination. This agrees with what was reported by Gutiérrez-Espinoza et al. (2011), who evaluated the effect of different concentrations of  $\text{Pb}(\text{NO}_2)_3$  (from 25 to 400  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) on sunflower seed germination and found that seeds germinated in all treatments. These authors argue that sunflower can be employed for Pb phytoremediation as indicated in other research (Ahmadreza et al., 2020; Gómez et al., 2018; Moslehi et al., 2019; Munive et al., 2020; Nehnevajova et al., 2005; Ortiz-Cano et al., 2009; Zhao et al., 2019).

#### Initial characterization of soil and vermicompost

The soil presented an initial Pb concentration of 16.05 ppm (Table 2), which was contaminated with 105 ppm Pb, resulting in a concentration of 121.05 ppm Pb (initial Pb level in the treatments). This value exceeds the EQS established for soils in agricultural areas, which is 70 ppm (MINAM, 2017).

The soil had a sandy loam texture, which facilitates sunflower root development. Organic matter content was moderate, so it requires the incorporation of a source of organic matter, such as vermicompost, to improve the Pb remediation process (Ortiz-Bernad et al., 2007; Volke-Sepúlveda & Velasco-Trejo, 2002). The soil had an initial pH close to neutrality, and did not present salinity problems. Although its CEC was limited, it should increase with the incorporation of vermicompost (Munive et al., 2020). The initial nitrogen level was deficient, but mineralization of the organic matter incorporated in the form of vermicompost increases its content (Vázquez & Loli, 2018). The applied vermicompost composition offers a good N level, and P and K values were sufficient to ensure sunflower growth.

Regarding the characterization of the vermicompost, good organic matter content was detected (Table 2). The carbon-nitrogen ratio was low, which facilitated

#### Fitotoxicidad en semillas de girasol

La prueba de fitotoxicidad se desarrolló para determinar la tolerancia de las semillas al Pb (35, 70 y 105 ppm). La tolerancia al Pb se determinó mediante la capacidad de las semillas para germinar. Los resultados mostraron un alto porcentaje de germinación (90 %) a los 10 días, incluso con la concentración de Pb más alta (105 ppm) (Cuadro 1). En todos los niveles de Pb, a los 15 días se logró un 100 % de germinación. Estos resultados permitieron elegir la dosis de 105 ppm de Pb para su aplicación al suelo como parte de los tratamientos.

De acuerdo con los resultados de fitotoxicidad, 105 ppm no afectan la germinación de semillas de girasol. Esto concuerda con lo reportado por Gutiérrez-Espinoza et al. (2011), quienes evaluaron el efecto de diferentes concentraciones de  $\text{Pb}(\text{NO}_2)_3$  (de 25 hasta 400  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) sobre la germinación de semillas de girasol y encontraron que las semillas germinaron en todos los tratamientos. Estos autores argumentan que el girasol puede ser empleado para la fitorremediación de Pb, tal como se señala en otras investigaciones (Ahmadreza et al., 2020; Gómez et al., 2018; Moslehi et al., 2019; Munive et al., 2020; Nehnevajova et al., 2005; Ortiz-Cano et al., 2009; Zhao et al., 2019).

#### Caracterización inicial del suelo y vermicompost

El suelo presentó una concentración de Pb inicial de 16.05 ppm (Cuadro 2), el cual se contaminó con 105 ppm de Pb, resultando en una concentración de 121.05 ppm de Pb (nivel inicial de Pb en los tratamientos). Dicho valor supera el ECA establecido para suelos de zonas agrícolas, que es de 70 ppm (MINAM, 2017).

El suelo presentaba textura franco-arenosa, la cual facilita el desarrollo radicular del girasol. La presencia de materia orgánica fue moderada, por lo que requiere la incorporación de una fuente de materia orgánica, como el vermicompost, para mejorar el proceso de

**Table 2. Initial analysis of soil and vermicompost used in the remediation process.****Cuadro 2. Análisis inicial del suelo y el vermicompost empleados en el proceso de remediación.**

Determination/Determinación	Soil/Suelo	Vermicompost
Sand (%) / Arena (%)	64.7	-
Silt (%) / Limo (%)	20.1	-
Clay (%) / Arcilla (%)	15.2	-
Texture / Textura	Sandy loam / Franco arenoso	-
BD (g·cm <sup>-3</sup> ) / DA (g·cm <sup>-3</sup> )	1.62	-
Total Pb (ppm) / Pb total (ppm)	16.05	-
Organic matter (%) / Materia orgánica (%)	3.91	20.63
pH	6.78	7.94
EC (dS·m <sup>-1</sup> ) / CE (dS·m <sup>-1</sup> )	0.23	20.13
CEC (cmol·kg <sup>-1</sup> ) / CIC (cmol·kg <sup>-1</sup> )	9.720	54.738
Total N (%) / N total (%)	0.20	1.46
Available P (ppm) / P disponible (ppm)	13.017	17.200
Exchangeable K (ppm) / K intercambiable (ppm)	212.480	1543.394
C/N	-	10/1

BD = bulk density; EC = electrical conductivity; CEC = cation exchange capacity; C/N = carbon-nitrogen ratio.

DA = densidad aparente; CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; C/N = relación carbono-nitrógeno.

the subsequent humification process of the medium. The CEC was high in the material, with good nutrient (N, P, K) inputs for the remedial plant. Organic matter and CEC favor the exchange of heavy elements, and make the bioremediation process of soils contaminated with heavy elements viable (Ortiz-Bernad et al., 2007; Vázquez & Loli, 2018).

#### Lead in soil after the remediation process

T2 (soil with Pb and vermicompost) had the highest level of recovered Pb (Table 3), which resulted in the lowest remaining Pb content in the soil, with a significant statistical difference with respect to the other treatments.

In soil, Pb is generally found in ionic form, oxides and hydroxides (Jiménez et al., 2017). Its mobility in the soil is limited, so it accumulates on the surface. This mobility depends on the organic matter content and CEC, among other soil characteristics (Karande et al., 2019). When Pb reacts, it can form insoluble compounds in the form of lead phosphates, carbonates and hydroxides (Hettiarachchi & Pierzynski, 2004).

In this work, it was evident that the use of vermicompost facilitated Pb recovery. This behavior is mainly associated with the high organic matter content (20.63 %) and the good CEC (54.738 cmol·kg<sup>-1</sup>). The organic matter contained in vermicompost is

remediación del Pb (Ortiz-Bernad et al., 2007; Volke-Sepúlveda & Velasco-Trejo, 2002). El suelo tuvo un pH inicial cercano a la neutralidad, y no presentó problemas de salinidad. Aunque su CIC fue limitada, ésta debería incrementar al incorporar el vermicompost (Munive et al., 2020). El nivel inicial de nitrógeno fue deficiente, pero la mineralización de la materia orgánica incorporada en forma de vermicompost incrementa su contenido (Vázquez & Loli, 2018). La composición de vermicompost aplicado ofrece buen nivel de N, y los valores de P y K fueron suficientes para asegurar el crecimiento del girasol.

En cuanto a la caracterización del vermicompost, se detectó un buen contenido de materia orgánica (Cuadro 2). La relación carbono-nitrógeno fue baja, lo cual facilitó el proceso subsecuente de humificación del medio. La CIC fue elevada en el material, con buenos aportes de nutrientes (N, P, K) para la planta remediadora. La materia orgánica y la CIC favorecen el intercambio de elementos pesados, y hacen viable el proceso de biorremediación de suelos contaminados con elementos pesados (Ortiz-Bernad et al., 2007; Vázquez & Loli, 2018).

#### Plomo en el suelo después del proceso de remediación

El T2 (suelo con Pb y vermicompost) presentó el mayor nivel de Pb recuperado (Cuadro 3), lo cual resultó en

**Table 3. Lead (Pb) recovered and remaining in the soil subjected to the remediation process.****Cuadro 3. Plomo (Pb) recuperado y remanente en el suelo sometido al proceso de remediación.**

Treatment/ Tratamiento	Pb recovered from the soil (ppm)/ Pb recuperado del suelo (ppm)				Remaining Pb content in the soil (ppm)/ Contenido de Pb remanente en el suelo (ppm)			
	R1	R2	R3	Average/ Promedio	R1	R2	R3	Average/ Promedio
T1	92.68	89.03	94.49	92.07 b <sup>z</sup>	28.37	32.02	26.56	28.98 a
T2	99.23	96.96	98.71	98.30 a	21.82	24.09	22.34	22.75 b
T3	87.66	89.83	90.02	89.17 b	33.39	31.22	31.03	31.88 a
T4	88.5	93.27	91.15	90.97 b	32.55	27.78	29.90	30.08 a

T1 = soil with Pb, vermicompost and sunflower; T2 = soil with Pb and vermicompost; T3 = soil with Pb and sunflower; T4 = soil with Pb. R1, R2 and R3 = replicates.

<sup>z</sup>Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

T1 = suelo con Pb, vermicompost y girasol; T2 = suelo con Pb y vermicompost; T3 = suelo con Pb y girasol; T4 = suelo con Pb. R1, R2 y R3 = repeticiones.

<sup>z</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

transformed into humic substances, especially humic acids, during the decomposition and mineralization process through resynthesis and polymerization reactions. Soil recovery from heavy elements, such as Pb, has been attributed to the action of humic acids (Rubenacker et al., 2011). According to Zhang et al. (2019), vermicompost has the ability to form organo-metal complexes between Pb and humic substances. Therefore, it is believed that the formation of functional groups (-COOH) acted as an active center to immobilize Pb. The results obtained are similar to those published by Carrillo-González, Maldonado-Torres, González-Chávez, and Cruz-Díaz (2014), who found that Pb availability in a contaminated soil decreased with the addition of vermicompost, being inversely proportional to the applied dose; this was associated with the formation and precipitation of Pb oxide.

The high CEC of the vermicompost improved the formation of organo-metal complexes of Pb and functional groups. According to Yuvaraj et al. (2021), this effect is due to the fact that the humic substances originated by the vermicompost make the process of cation exchange of fractionated heavy metals in contaminated soils viable.

Regarding recovery efficiency, Table 4 shows that T2 had the best performance in the recovery of Pb from the soil, although all treatments removed Pb below the EQS for agricultural soils (70 ppm). Therefore, it was deduced that all treatments performed well in Pb removal.

The best recovery efficiency, evidenced in T2, allows inferring that Pb removal assisted with amendments, such as vermicompost, is an effective method to reduce the bioavailability of this toxic soil element (Branzini &

el menor contenido de Pb remanente en el suelo, con diferencia estadística significativa respecto a los demás tratamientos.

En el suelo, el Pb se encuentra, generalmente, en forma iónica, óxidos e hidróxidos (Jiménez et al., 2017). Su movilidad en el suelo es limitada, por lo que se acumula en la parte superficial. Dicha movilidad depende del contenido de materia orgánica, la CIC, entre otras características del suelo (Karande et al., 2019). Al reaccionar el Pb puede formar compuestos insolubles en forma de fosfatos, carbonatos e hidróxidos de plomo (Hettiarachchi & Pierzynski, 2004).

En este trabajo, fue evidente que el uso de vermicompost facilitó la recuperación de Pb. Dicho comportamiento está asociado, principalmente, al alto contenido de materia orgánica (20.63 %) y a la buena CIC (54.738 cmol·kg<sup>-1</sup>). La materia orgánica contenida en el vermicompost es transformada a sustancias húmicas, especialmente ácidos húmicos, durante el proceso de descomposición y mineralización mediante reacciones de resíntesis y polimerización. La recuperación del suelo a elementos pesados, como el Pb, ha sido atribuida a la acción de los ácidos húmicos (Rubenacker et al., 2011). Según Zhang et al. (2019), el vermicompost tiene la habilidad de formar complejos organo-metálicos entre el Pb y las sustancias húmicas. Por ello, se cree que la formación de grupos funcionales (-COOH) actuó como centro activo para inmovilizar el Pb. Los resultados obtenidos son similares a los publicados por Carrillo-González, Maldonado-Torres, González-Chávez, y Cruz-Díaz (2014), quienes encontraron que la disponibilidad de Pb en un suelo contaminado disminuyó con la adición de vermicompost, siendo inversamente proporcional a la dosis aplicada; esto se asoció con la formación y precipitación de óxido de Pb.



**Table 4. Lead (Pb) recovery efficiency at the end of the remediation process.****Cuadro 4. Eficiencia de recuperación de plomo (Pb) al final del proceso de remediación.**

Treatment / Tratamiento	Initial Pb (ppm) / Pb inicial (ppm)	Recovered Pb (ppm) / Pb recuperado (ppm)	Recovery efficiency (%) / Eficiencia de recuperación (%)
T1	121.05	92.07	76.06
T2	121.05	98.30	81.21
T3	121.05	89.17	73.66
T4	121.05	90.97	75.15

T1 = soil with Pb, vermicompost and sunflower; T2 = soil with Pb and vermicompost; T3 = soil with Pb and sunflower; T4 = soil with Pb.

T1 = suelo con Pb, vermicompost y girasol; T2 = suelo con Pb y vermicompost; T3 = suelo con Pb y girasol; T4 = suelo con Pb.

Zubillaga, 2010); this is due to its high stability, bacterial fiber content and assimilable nutrients (Manaf et al., 2009). The incorporation of vermicompost favors the immobilization of contaminants by improving the formation of colloidal complexes and the biological activity of the soil (Carrillo-González et al., 2014). Obaji et al. (2017) point out that vermicompost, used as a soil amendment, has high potential in Pb removal due to its persistent nature and formation of active sites, which favor the sorption of heavy metals.

The performance of T1 revealed that sunflower, supplemented with vermicompost, is also efficient in Pb recovery, removing it below the EQS. Jun et al. (2020) note that Pb can enter the plant through the roots and concentrate in the foliar part; therefore, plant growth and development should be favored during the phytoremediation process (Rostami & Azhdarpoor, 2019). Zhang et al. (2019) argue that phytoremediation should be assisted with soil amendments, such as vermicompost, to facilitate the bioaccumulation of metals in plant tissues. The incorporation of vermicompost into the soil facilitates the establishment of sunflower plants to remove Pb because it favors organic matter, CEC and soil biological activity (Branzini & Zubillaga, 2010).

#### Behavior of sunflower plants in the remediation of contaminated soil

Regarding the BF of the aerial part and roots of sunflower plants, Table 5 indicates that both treatments (T1 and T3) showed values < 1, behaving as an exclusive plant species (Audet & Charest, 2007). However, T1 registered lower values than T3 due to the use of vermicompost, which favors Pb bioconcentration in the aerial part and roots of sunflower. This behavior agrees with the observations of Malkowski, Kurtyka, Kita, and Karcz (2005), who indicate that Pb accumulates in the root system in the form of Pb phosphate, which stimulates cell wall thickening.

Some plant species can extract and accumulate Pb in the root, stem and leaves to stabilize it. These species form organic compounds and enclose Pb in

La alta CIC que presentó el vermicompost mejoró la formación de complejos organo-metálicos de Pb y grupos funcionales. De acuerdo con Yuvaraj et al. (2021), este efecto se debe a que las sustancias húmicas originadas por el vermicompost viabilizan el proceso de intercambio catiónico de metales pesados fraccionados en los suelos contaminados.

En cuanto a la eficiencia de recuperación, en el Cuadro 4 se puede observar que el T2 tuvo el mejor desempeño en la recuperación de Pb del suelo; aunque todos los tratamientos removieron el Pb por debajo del ECA para suelos agrícolas (70 ppm). Por lo tanto, se dedujo que todos los tratamientos tuvieron buen desempeño en la remoción de Pb.

La mejor eficiencia de recuperación, evidenciada en el T2, permite inferir que la remoción de Pb asistida con enmiendas, como el vermicompost, es un método eficaz para reducir la biodisponibilidad de este elemento tóxico del suelo (Branzini & Zubillaga, 2010); esto debido a su elevada estabilidad, contenido de fibra bacteriana y nutrientes asimilables (Manaf et al., 2009). La incorporación de vermicompost favorece la inmovilización de contaminantes al mejorar la formación de complejos coloidales y la actividad biológica del suelo (Carrillo-González et al., 2014). Obaji et al. (2017) señalan que el vermicompost, usado como enmienda de suelos, presenta un alto potencial en la remoción de Pb por su naturaleza persistente y formación de sitios activos, los cuales favorecen la sorción de metales pesados.

El desempeño del T1 reveló que el girasol, complementado con vermicompost, también es eficiente en la recuperación de Pb, al removerlo por debajo del ECA. Jun et al. (2020) mencionan que el Pb puede ingresar a la planta mediante las raíces y concentrarse en la parte foliar; por ello, se debe favorecer el crecimiento y desarrollo de la planta durante el proceso de fitorremediación (Rostami & Azhdarpoor, 2019). Zhang et al. (2019) sostienen que la fitorremediación debe ser asistida con enmiendas al suelo, como el vermicompost, para facilitar la bioacumulación de metales en los tejidos de las plantas. La incorporación

**Table 5. Bioconcentration factor (BF) of the aerial part and roots of sunflower plants.****Cuadro 5. Factor de bioconcentración (FB) de la parte aérea y raíces de plantas de girasol.**

Treatment/ Tratamiento	Soil Pb (ppm)/ Pb suelo (ppm)	Aerial part Pb (ppm)/ Pb parte aérea (ppm)	Aerial part BF/ FB parte aérea	Root Pb (ppm)/ Pb raíces (ppm)	Root BF / FB de raíces
T1	121.05	7.97	0.07	10.80	0.09
T3	121.05	62.20	0.51	22.51	0.19

T1 = soil with Pb, vermicompost and sunflower; T3 = soil with Pb and sunflower.

T1 = suelo con Pb, vermicompost y girasol; T3 = suelo con Pb y girasol.

the cell wall and vacuole (Gutiérrez-Espinoza et al., 2011). Sunflower has high Pb extraction capacity and tolerance to Pb because it develops mechanisms to enhance antioxidant enzyme activity, Pb deposition in non-active parts of the plant and stimulation of plant osmolytes (Moslehi et al., 2019).

Marmiroli, Antonioli, Maestri, and Marmiroli (2005) argue that part of the flux of heavy metals, such as Pb, can be retained in the cell wall by the ligno-cellulosic structure. Plant species can reduce the toxicity of metals in their environment by adopting different abilities to resist, such as the exclusion of the metal, which limits its transfer to the aerial part, or the accumulation of the metal in the leaf part in non-toxic forms (Alderete-Suarez, Valles-Aragón, Canales-Reyes, Peralta-Pérez, & Orrantia-Borunda, 2019).

The TF of T1 was  $< 1$  (Table 6), revealing that the roots of the sunflower plant, in the presence of vermicompost, promote the Pb phytostabilization mechanism (Audet & Charest, 2007; Deng et al., 2004). In this way, Pb is retained in the sunflower root system with the help of vermicompost, whose function is to capture Pb in the clay-humic complex of the soil (Branzini & Zubillaga, 2010; Carrillo-González et al., 2014). Pb in an ionic state enters the plant through the roots by passive diffusion, and once absorbed by the plant, most of it is retained in the roots by ion exchange bonds in the cell wall (Alvarado, Dasgupta-Schubert, Ambriz, Sánchez-Yañez, & Villegas, 2011).

The T3 results registered a TF  $> 1$ , which indicates that the sunflower plant in the absence of vermicompost enhances the translocation of Pb from the roots to the aerial part of the plant. In this case, as there is no vermicompost, the Pb phytoextraction mechanism of the sunflower plant is boosted (Audet & Charest, 2007; Deng et al., 2004; Ortiz-Cano et al., 2009), and concentrates the Pb in the aerial part of the plant (Nehnevajova et al., 2005).

Munive et al. (2020) obtained similar results (BF of 0.08 and TF of 1.2) when using vermicompost and sunflower as a Pb phytoremediation plant. Alaboudi, Ahmed, and Brodie (2018) demonstrated that the sunflower,

de vermicompost al suelo facilita el establecimiento de plantas de girasol para remover el Pb debido a que favorece la materia orgánica, la CIC y la actividad biológica del suelo (Branzini & Zubillaga, 2010).

#### Comportamiento de plantas de girasol en la remediación de suelo contaminado

Con relación al FB de la parte aérea y raíces de las plantas de girasol, el Cuadro 5 indica que ambos tratamientos (T1 y T3) mostraron valores  $< 1$ , comportándose como una especie vegetal excluyente (Audet & Charest, 2007). Sin embargo, el T1 registró valores menores que el T3 debido al uso de vermicompost, el cual favorece la bioconcentración de Pb en la parte aérea y raíces de girasol. Este comportamiento concuerda con lo observado por Malkowski, Kurtyka, Kita, y Karcz (2005), quienes indican que el Pb se acumula en el sistema radicular en forma de fosfato de Pb, lo cual estimula el engrosamiento de la pared celular.

Algunas especies vegetales pueden extraer y acumular Pb en la raíz, el tallo y las hojas para estabilizarlo. Estas especies forman compuestos orgánicos y encierran el Pb en la pared celular y la vacuola (Gutiérrez-Espinoza et al., 2011). El girasol tiene alta capacidad de extracción y tolerancia al Pb debido a que desarrolla mecanismos para mejorar la actividad de las enzimas antioxidantes, la deposición de Pb en partes no activas de la planta y la estimulación de osmolitos vegetales (Moslehi et al., 2019).

Marmiroli, Antonioli, Maestri, y Marmiroli (2005) sostienen que parte del flujo de los metales pesados, como el Pb, puede quedar retenido en la pared celular por la estructura de la lignina y la celulosa. Las especies vegetales pueden disminuir la toxicidad de metales de su entorno al adoptar diferentes habilidades para resistir, como la exclusión del metal, lo cual limita su traslado a la parte aérea, o la acumulación del metal en la parte foliar en formas no tóxicas (Alderete-Suarez, Valles-Aragón, Canales-Reyes, Peralta-Pérez, & Orrantia-Borunda, 2019).

El FT del T1 fue  $< 1$  (Cuadro 6), lo cual revela que las raíces de la planta de girasol, en presencia de vermicompost, fomentan el mecanismo de

**Table 6. Translocation factor (TF) in sunflower plants.****Cuadro 6. Factor de traslocación (FT) en plantas de girasol.**

Treatment/ Tratamiento	Description/Descripción	Aerial part Pb (ppm)/ Pb parte aérea (ppm)	Root Pb (ppm)/ Pb raíces (ppm)	TF/FT
T1	Soil with Pb, vermicompost and sunflower/ Suelo con Pb, vermicompost y girasol	7.97	10.80	0.74
T3	Soil with Pb and sunflower/ Suelo con Pb y girasol	62.20	22.51	2.76

by increasing its biomass, was able to remove toxic substances from contaminated soil because of its ability to adapt to adverse environments.

Finally, a soil analysis was performed in T2 (soil with Pb and vermicompost) at the end of the remediation process, since this treatment achieved the highest efficiency in Pb recovery. The analysis found a sandy loam texture, without variation with respect to the initial soil texture. Organic matter increased from 3.91 to 4.12 %, which is associated with the incorporation of organic matter through vermicompost. The pH changed slightly from 6.78 to 6.93, and salinity increased to 3.11 dS·m<sup>-1</sup>, although this value does not imply salinity problems. CEC increased from 9.72 to 17.872 cmol·kg<sup>-1</sup> due to the increase in organic matter. Total N, available P and exchangeable K presented values of 0.47 %, 16.250 ppm and 218.733 ppm, respectively, which were higher than those identified at the beginning of the remediation process and are associated with decomposition processes of the soil organic matter and with the vermicompost, which through its mineralization released these nutrients. Consequently, T2 was not only the most efficient in Pb recovery, but also favored soil properties.

## Conclusions

All treatments reduced soil Pb below the national EQS for agricultural soils (70 ppm Pb); however, T2 (soil with Pb and vermicompost) achieved the highest Pb recovery (81.21 %), with a significant statistical difference with respect to the other treatments. The Pb bioconcentration factor in the aerial part and roots of sunflower plants in T1 and T3 was < 1; therefore, the sunflower behaved as an exclusive plant species. According to the Pb translocation factor, the sunflower plant in the presence of vermicompost (T1) performed as a Pb phytostabilizing plant (TF < 1), and in the absence of vermicompost (T3) it behaved as a Pb phytoextractor (TF > 1). Consequently, the use of sunflower and vermicompost offers an alternative for the recovery of Pb in contaminated agricultural soils, and may constitute a viable strategy for its remediation.

fitoestabilización del Pb (Audet & Charest, 2007; Deng et al., 2004). De esta forma, el Pb queda retenido en el sistema radicular del girasol con ayuda del vermicompost, cuya función es capturar Pb en el complejo arcillo húmico del suelo (Branzini & Zubillaga, 2010; Carrillo-González et al., 2014). El Pb en estado iónico ingresa a la planta a través de las raíces mediante difusión pasiva, y una vez absorbido por la planta, la mayor parte queda retenido en las raíces mediante enlaces de intercambio iónico en la pared celular (Alvarado, Dasgupta-Schubert, Ambriz, Sánchez-Yañez, & Villegas, 2011).

Los resultados del T3 registraron un FT > 1, lo cual advierte que la planta de girasol en ausencia de vermicompost mejora la traslocación de Pb desde las raíces hacia la parte aérea de la planta. En este caso, al no existir vermicompost, se impulsa el mecanismo de fitoextracción de Pb de la planta de girasol (Audet & Charest, 2007; Deng et al., 2004; Ortiz-Cano et al., 2009), y concentra el Pb en la parte aérea de la planta (Nehnevajova et al., 2005).

Munive et al. (2020) obtuvieron resultados similares (FB de 0.08 y FT de 1.2) al utilizar vermicompost y girasol como planta fitorremediadora de Pb. Alaboudi, Ahmed, y Brodie (2018) demostraron que el girasol, al incrementar su biomasa, fue capaz de remover sustancias tóxicas de suelos contaminados por su capacidad de adaptación a ambientes adversos.

Finalmente, se realizó un análisis de suelo en el T2 (suelo con Pb y vermicompost) al culminar el proceso de remediación; esto debido a que dicho tratamiento logró la mayor eficiencia en la recuperación de Pb. El análisis reportó una textura franco-arenosa, sin variación con respecto a la textura inicial del suelo. La materia orgánica incrementó de 3.91 a 4.12 %, lo cual está asociado con la incorporación de materia orgánica a través de vermicompost. El pH se modificó ligeramente de 6.78 a 6.93, y la salinidad aumentó hasta 3.11 dS·m<sup>-1</sup>, aunque este valor no implica problemas de salinidad. La CIC pasó de 9.72 a 17.872 cmol·kg<sup>-1</sup> por el incremento de materia orgánica. El N total, el P disponible y el K intercambiable presentaron valores de 0.47 %, 16.250 ppm y 218.733 ppm, respectivamente,

*End of English version*

## References / Referencias

- Ahmadreza, Y., Seyed, A., Seyed, V., Fatemed, K., & Zainab, K. (2020). Heavy metals uptake of salty soils by ornamental sunflower, using cow manure and biosolids: a case study in Alborz city, Iran. *Air Soil and Water Research*, 13(1), 1-13. doi: 10.1177/1178622119898460
- Alaboudi, K., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 123-127. doi: 10.1016/j.aos.2018.05.007
- Alderete-Suarez, M., Valles-Aragón, M., Canales-Reyes, S., Peralta-Pérez, M., & Orrantia-Borunda, E. (2019). Bioconcentración de Pb, Cd y As en biomasa de *Eleocharis macrostachya* (Cyperaceae). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(1), 93-101. doi: 10.20937/RICA.2019.35.esp03.11
- Alvarado, C., Dasgupta-Schubert, N., Ambriz, E., Sánchez-Yañez, J., & Villegas, J. (2011). Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), 357-364. Retrieved from <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/28243>
- Astete, J., Cáceres, W., Gastañaga, M., Lucero, M., Sabastizagal, I., Oblitas, T., Pari, J., & Rodríguez, F. (2009). Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1), 15-19. doi: 10.17843/rpmesp.2009.261.1327
- Audet, P., & Charest, C. (2007). Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives. *Environmental pollution*, 147(3), 609-614. doi: 10.1016/j.envpol.2006.10.006
- Bazán-Tapia, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Retrieved from [https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual\\_de\\_procedimientos\\_de\\_los.pdf](https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf)
- Branzini, A., & Zubillaga, M. (2010). Assessing phytotoxicity of heavy metals in remediated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 12(4), 335-342. doi: 10.1080/15226510902968126
- Carrillo-González, R., Maldonado-Torres, A., González-Chávez, M., & Cruz-Díaz, J. (2014). Estabilización de elementos potencialmente tóxicos en residuos de mina por aplicación de roca fosfórica y vermicompost. *Ciencia en la frontera: Revista de Ciencia y Tecnología de la UACJ*, 12(1), 15-26. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/270277623>
- Delgadillo-López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612. Retrieved from <https://www.revista.coba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/814>
- que fueron mayores a los identificados al inicio de proceso de remediación y están asociados con procesos de descomposición de la materia orgánica del suelo y con el vermicompost, que a través de su mineralización se liberaron estos nutrientes. En consecuencia, el T2 no solo logró ser el más eficiente en la recuperación de Pb, sino que también favoreció las propiedades del suelo.
- ## Conclusiones
- Todos los tratamientos redujeron el Pb del suelo por debajo del ECA nacional para suelos agrícolas (70 ppm de Pb); sin embargo, el T2 (suelo con Pb y vermicompost) logró la mayor recuperación de Pb (81.21 %), con diferencia estadística significativa respecto de los demás tratamientos. El factor de bioconcentración de Pb en la parte aérea y raíces de las plantas de girasol en el T1 y el T3 fue < 1; por tanto, el girasol se comportó como una especie vegetal exclusiva. De acuerdo con el factor de traslocación de Pb, la planta de girasol en presencia de vermicompost (T1) se desempeñó como planta fitoestabilizadora de Pb (FT < 1), y en ausencia de vermicompost (T3) se comportó como planta fitoextractora de Pb (FT > 1). En consecuencia, el uso de girasol y vermicompost ofrece una alternativa para la recuperación de Pb en suelos agrícolas contaminados, y puede constituir una estrategia viable para su remediación.
- ### Fin de la versión en español
- 
- Deng, H., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2004). Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental Pollution*, 132(1), 29-40. doi: 10.1016/j.envpol.2004.03.030
- Dos-Santos, J., Marengo-Centeno, C., Vieira-de Azevedo, C., Raj-Gheyi, H., Soares-de Lima, G., & Lira, V. (2017). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth depending on irrigation with saline water and nitrogen fertilization. *Agrociencia*, 51(6), 649-660. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/ago-sep/art-5.pdf>
- Gerhardt, K., Huang, X., Glick, B., & Greenberg, B. (2009). Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. *Plant Science*, 176(1), 20-30. doi: 10.1016/j.plantsci.2008.09.014
- Gómez, L., Contreras, A., Bolonio, D., Quintana, J., Oñate-Sánchez, L., & Merino, I. (2018). Phytoremediation with trees. *Advances in Botanical Research*, 89, 281-321. doi: 10.1016/bs.abr.2018.11.010
- Gutiérrez-Espinoza, L., Melgoza-Castillo, A., Alarcón-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, J. A., Prado-Tarango, D. E., & Cedillo-Alcantar, M. E. (2011). Germinación del girasol silvestre (*Helianthus annuus* L.) en presencia de diferentes concentraciones de metales. *Revista Latinoamericana de*



- Biotecnología Ambiental y Algal*, 2(1), 49-56. Retrieved from <http://www.solabiaa.org/ojs3/index.php/RELBAA/article/view/27>
- Hazrat, A., Ezzat, K., & Muhammad, A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075
- Hettiarachchi, G. M., & Pierzynski, G. M. (2004). Soil lead bioavailability and in situ remediation of lead-contaminated soils: A review. *Environmental Progress*, 23(1), 78-93. doi: 10.1002/ep.10004
- International Business Machines (IBM). (2013). *IBM SPSS statistics base 22*. USA: IBM. Retrieved from [https://www.academia.edu/4292064/IBM\\_SPSS\\_Statistics\\_Base\\_22\\_en\\_espa%C3%B1ol](https://www.academia.edu/4292064/IBM_SPSS_Statistics_Base_22_en_espa%C3%B1ol)
- Jiménez, B., Navarro, J., Gómez, I., & Almendro, M. (2017). Contaminación de suelos por elementos pesados. In: Jiménez, B. R. (Ed), *Introducción a la contaminación de los suelos* (pp. 39-71). España: Mundi-Prensa.
- Jun, L., Huang, W., Aili, M., Juan, N., Hongyan, X., Jingsong, H., Yunhua, Z., & Cuiying, P. (2020). Effect of lychee biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil using sunflower: A field experiment. *Environmental Research*, 18, 109886. doi: 10.1016/j.envres.2020.109886
- Karande, U. B., Kadam, A., Umrikar, B. N., Wagh, V., Sankhua, R. N., & Pawar, N. J. (2019). Environmental modelling of soil quality, heavy-metal enrichment and human health risk in sub-urbanized semiarid watershed of western India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 545-556. doi: 10.1007/s40808-019-00701-z
- Liu, Y., Cui, J., Peng, Y., Lu, Y., Yao, D., Yang, J., & He, Y. (2020). Atmospheric deposition of hazardous elements and its accumulation in both soil and grain of winter wheat in a lead-zinc smelter contaminated area, Central China. *Science of the Total Environment*, 707, 135789. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135789
- Malkowski, E., Kurtyka, R., Kita, A., & Karcz, W. (2005). Accumulation of Pb and Cd and its effect on Ca distribution in Maize seedlings. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(2), 203-207. Retrieved from <http://www.pjoes.com/Accumulation-of-Pb-and-Cd-and-its-Effect-on-Ca-Distribution-in-Maize-Seedlings-Zea,87749,0,2.html>
- Manaf, L. A., Jusoh, M. L., Yusoff, M. K., Ismail, T. H., Harun, R., Juahir, H., & Jusoff, K. (2009). Influences of bedding material in vermicomposting process. *International Journal of Biology*, 1(1), 81-91. doi: 10.5539/ijb.v1n1p81
- Marmiroli, M., Antonioli, G., Maestri, E., & Marmiroli, N. (2005). Evidence of the involvement of plant lignocellulosic structure in the sequestration of Pb: an xray spectroscopy-based analysis. *Environmental Pollution*, 134(2), 217-227. doi: 10.1016/j.envpol.2004.08.004
- Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM). (2017). *Estándar de calidad ambiental para suelos (ECA): Decreto supremo núm. 011-2017-MINAM*. Perú: MINAM. Retrieved January 12, 2020 from <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-011-2017-minam/>
- Moslehi, A., Feizian, M., Higuera, P., & Eisvand, H. R. (2019). Assessment of EDDS and vermicompost for the phytoextraction of Cd and Pb by sunflower (*Helianthus annuus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 21(3), 191-199. doi: 10.1080/15226514.2018.1501336
- Munive, R., Gamarra, G., Munive, Y., Puertas, F., Valdivieso, L., & Cabello, R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177-186. doi: 10.17268/sci.agropecu.2020.02.04
- Nehnevajova, E., Herzig, R., Federer, G., Erismann, K. H., & Schwitzguébel, J. P. (2005). Screening of sunflower cultivars for metal phytoextraction in a contaminated field prior to mutagenesis. *International Journal of Phytoremediation*, 7(4), 337-349. doi: 10.1080/16226510500327210
- Obaji, A., Romero, K., Combatt, E., Díaz, L., Burgos, S., Urango, I., & Marrugo, J. (2017). Evaluación de materiales como potenciales retenedores de metales pesados para su aplicación como enmiendas en suelos contaminados. *Seminario Internacional de Ciencias Ambientales SUE-Caribe*, 1(1), 209-211.
- Ortiz-Bernad, I., Sanz-García, J., Dorado-Valiño, M., & Villar-Fernández, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. España: Fundación para el conocimiento madri+d. Retrieved from [https://www.madrimas.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6\\_tecnicas\\_recuperacion\\_suelos\\_contaminados.pdf](https://www.madrimas.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf)
- Ortiz-Cano, H., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R., Arreola-Ávila, J., Flores-Hernández, A., & López-Ariza, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2), 161-168. doi: 10.5154/r.rchsh.2009.15.022
- Rostami, S., & Azhdarpoor, A. (2019). The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: A review. *Chemosphere*, 220, 818-827. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.203
- Rubenacker, A., Campitelli, P., Sereno, R., & Ceppi, S. (2011). Chemical recovery of a degraded soil by vermicompost utilization. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(2), 83-95. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627682008.pdf>
- Tognetti, C., Laos, F., Mazzarino, M. J., & Hernández, M. T. (2005). Composting vs vermicomposting: a comparison of end product quality. *Compost Science and Utilization*, 13(1), 6-13. doi: 10.1080/1065657X.2005.10702212
- Vázquez, J., & Lolí, O. (2018). Compost y vermicompost como enmiendas en la recuperación de un suelo degradado por el manejo de *Gypsophila paniculata*. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 43-52. doi: 10.17268/sci.agropecu.2018.01.05
- Volke-Sepúlveda, T., & Velasco-Trejo, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México: Instituto Nacional de Ecología. Retrieved from <https://www.iner.mx/>

- researchgate.net/publication/31851896\_Tecnologias\_de\_remediacion\_para\_suelos\_contaminados
- Yuvaraj, A., Govarthanan, M., Karmegam, N., Biruntha, M., Kumar, D. S., Arthanari, M., Kaveriyappan, R., Tripathi, S., Ghosh, S., Kumar, P., Kannan, S., & Thangaraj, R. (2021). Metallothionein dependent-detoxification of heavy metals in the agricultural field soil of industrial area: Earthworm as field experimental model system. *Chemosphere*, 267, 129240. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129240
- Zhang, Y., Tian, Y., Hu, D., Fan, J., Shen N., & Zeng, H. (2019). Is vermicompost the possible in situ sorbent? Immobilization of Pb, Cd and Cr in sediment with sludge derived vermicompost a column study. *Journal of Hazardous Materials*, 367, 83-90. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.085
- Zhao, X., Joo, J. C., Lee, J. K., & Kim, J. (2019). Mathematical estimation of heavy metal accumulations in *Helianthus annuus* L. with a sigmoid heavy metal uptake model. *Chemosphere*, 220, 965-973. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.210
- Zia, M., Rizwan, M., Ali, S., Sabir, M., & Sohail, M. (2017). Contrasting effects of organic and inorganic amendments on reducing lead toxicity in wheat. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99(5), 642-647. doi: 10.1007/s00128-017-2177-4