



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Electrofitorremediación: remediación híbrida ex situ para la remoción de cromo hexavalente mediante *Solanum elaeagnifolium* Cav. y la aplicación de un campo eléctrico

Electrophytoremediation: ex situ hybrid remediation for hexavalent chromium removal by *Solanum elaeagnifolium* Cav. and the application of an electric field

Romero-Cervantes, M.^a, García-Zúñiga, M.^b, Castro-Salazar, J.I.^a, López-Almanza, E.^{a*}

^a Departamento de Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. Abasolo, Guanajuato, CP. 36970, México.

^b Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Abasolo. Abasolo, Guanajuato, CP. 36970, México.

izabelacervantes97@gmail.com; monica.gz@abasolo.tecnm.mx; ignacio.cs@abasolo.tecnm.mx; erick.la@abasolo.tecnm.mx*

Innovación Tecnológica: Combinación de técnicas fisicoquímicas y biológicas de remediación de suelos para la remoción de metales pesados usados en la industria curtidora.

Área de aplicación industrial: Remediación de suelos contaminados.

Recibido: 25 agosto 2022

Aceptado: 03 marzo 2023

Abstract

The presence of hexavalent chromium (Cr (VI)) in soils is an environmental problem that has increased in recent decades in Mexico. This increase is due to the use given to the metal by different industrial sectors, including, for example, the leather tanning industry which uses chromium salts to soften the leather, and the automotive industry that uses the metal for chrome plating of auto parts. Both industries are well established in the state of Guanajuato; However, they are also among the most polluting industrial sectors, releasing Cr (VI) residues into the environment, especially the tanning industry, as most of the companies in the sector are artisanal. Although physicochemical techniques have been developed for the removal of heavy metals, they tend to be expensive and, in some cases, can generate other compounds that can be equally or more toxic than the original ones. Therefore, hybrid soil remediation techniques, such as electrophytoremediation, can be used for the removal of Cr (VI) from industrial soils. In this study, soil extracted from the P.I.E.L. Park in León was used, which is known for grouping together most of the companies that carry out the tanning process. The objective was to evaluate the

electrophytoremediation technique at different concentrations of the contaminant (140, 395, and 620 mg/Kg) established on the basis of reference values indicated in the Mexican environmental regulations (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) for soils of industrial use, applying a current of 20 volts for 24 hours during a period of 28 days and comparing it with separate techniques (phytoremediation and electroremediation) under the same treatment conditions. The plant used was a native plant from the sampling site, identified as *Solanum elaeagnifolium* Cav. An alkaline digestion was carried out on the soil for the extraction of Cr (VI), and its final concentration was analyzed by a colorimetric reaction with diphenyl-carbazide in acid solution, and its absorbance was measured at 540 nm, determining that for electrophytoremediation, the maximum removal of hexavalent chromium was 92.40% at 620 mg/Kg, while in electroremediation, it was 88.30% for 395 mg/Kg, and in phytoremediation, 28.31% at 140 mg/Kg. The effect on the pH of the soil treated with the techniques separately and combined was also evaluated, observing that the pH remains unchanged, favoring the removal of the metal. These results demonstrate the effectiveness of electrophytoremediation for the recovery of industrial soils contaminated with this metal compared to other techniques.

Keywords: chromium, electrokinetics, electrophytoremediation, electroremediation, phytoremediation.

Resumen

La presencia de cromo hexavalente (Cr (VI)) en suelos es una problemática ambiental que se ha incrementado en las últimas décadas en México, este aumento se debe al uso que se le da al metal por distintos sectores industriales, entre ellos se encuentran por ejemplo el curtido de pieles que hace uso de sales de cromo para ablandar la piel y la industria automotriz que utiliza el metal para el cromado de autopartes, ambas industrias están bastante arraigadas en el estado de Guanajuato; sin embargo también son de los sectores industriales más contaminantes al liberar residuos de Cr (VI) al ambiente, sobre todo la industria curtidora ya que la mayoría de las empresas del gremio son de carácter artesanal. A pesar de que se han desarrollado técnicas fisicoquímicas para la remoción de metales pesados, estas tienden a ser costosas y en algunos casos pueden generar otro tipo de compuestos que pueden ser igual o más tóxicos que los originales. Es por ello, que las técnicas híbridas de remediación de suelos, como la electrofitorremediación, pueden utilizarse para la remoción de Cr (VI) presente en suelos industriales. En este estudio se utilizó suelo extraído del Parque P.I.E.L. de León, el cual es reconocido por agrupar a la mayoría de las empresas que realizan el proceso de curtido. El objetivo consistió en evaluar la técnica de electrofitorremediación a diferentes concentraciones del contaminante (140, 395 y 620 mg/Kg) establecidos en base a los valores de referencia indicados en la normatividad ambiental mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) para suelos de uso industrial, aplicando una corriente de 20 Volts por 24 horas durante en un periodo de 28 días y compararla con las técnicas por separado (fitorremediación y electrorremediación) a las mismas condiciones de tratamiento, la planta utilizada fue una planta nativa del sitio de muestreo la cual se identificó como *Solanum elaeagnifolium* Cav., se realizó una digestión alcalina al suelo para la extracción de Cr (VI) y se

analizó su concentración final mediante una reacción colorimétrica con difenil-carbazida en solución ácida y se midió su absorbancia a 540 nm, determinando que para la electrofitorremediación la máxima remoción de cromo hexavalente fue de 92.40% a 620 mg/Kg, mientras que en la electrorremediación fue de 88.30% para 395 mg/Kg y en la fitorremediación de 28.31% a 140 mg/Kg. También se evaluó el efecto sobre el pH del suelo tratado con las técnicas por separado y combinadas, observando que este se mantiene inalterado favoreciendo con ello la remoción del metal. Demostrando con estos resultados, la eficacia de la electrofitorremediación para la recuperación de suelos industriales contaminados con este metal en comparación con otras técnicas.

Palabras clave: cromo, electrocinética, electrofitorremediación, electrorremediación, fitorremediación.

1. Introducción

La presencia de metales pesados en el suelo es un problema que se ha intensificado en las últimas décadas en nuestro país, estos metales son el resultado de diversos procesos productivos, por ejemplo, la industria metalmecánica, la minería, la industria automotriz, la aeronáutica, entre otras. Sin embargo, esta contaminación también puede tener un origen natural. En términos de abundancia y de toxicidad, los metales más contaminantes son: mercurio, arsénico, plomo y cromo (Abraham-Covarrubias & Peña-Cabriales, 2017).

De acuerdo con Carrillo (2017), el sector productivo del curtido de pieles está representado por dos gremios bien definidos; aquellas empresas que conforman la Cámara de Industriales de la Curtiduría (CICUR), las cuales al ser empresas establecidas legalmente y en algunos casos al ser empresas transnacionales siguen una política ambiental, hacen uso de tecnologías de punta y establecen estrategias de cumplimiento de la normativa ambiental; mientras que el segundo grupo está conformado por micro, pequeñas y medianas empresas, en su mayoría son empresas familiares que no tienen un carácter legal y con una orientación de producción más tradicional, ligadas a la Asociación Nacional de Curtidores, que son más reacios a adoptar prácticas ambientales y

están orientadas al mercado nacional. Este último grupo de empresas, conforman el 90% del sector, y al ser empresas de carácter más artesanal que industrial tienen muy poco o nulo gasto en innovación e investigación para la protección ambiental, debido a ello es muy común que realicen descargas clandestinas de sales de cromo utilizadas en el proceso de curtido de pieles a cuerpos de agua y al suelo originando un problema de contaminación (Hernández & Contreras, 2022).

El proceso de curtido de las pieles comienza al despellejar al animal sacrificado, su posterior almacenamiento en frío y venta en forma de cuero curtido, semiterminado o terminado. Para realzar el curtido, se suelen emplear alguno de estos dos métodos, el curtido vegetal, donde se usan compuestos vegetales extraídos de plantas y/o árboles y el curtido al cromo, donde las pieles son inmersas en soluciones de sal y ácido para posteriormente recibir un baño de sulfato de cromo (Dussel & Cárdenas, 2018).

De las opciones anteriormente mencionadas, el curtido vegetal es más amigable con el ambiente, sin embargo tiende a ser un proceso más largo y delicado, ya que si no se tiene precaución se puede arruinar el cuero volviéndolo rígido, al contrario del curtido al cromo, el cual es más rápido y práctico ya que genera pieles más flexibles, las cuales son

idóneas para su uso en la industria automotriz y del calzado, sin embargo, es el más contaminante por el efecto tóxico del cromo (Ortiz-Gutiérrez et al., 2021).

Mundialmente se curten al cromo el 85% del total de las pieles que se destinan para curtiduría; sin embargo, estudios realizados por Martínez-Buitrago & Romero-Coca (2017) demuestran que el cuero y sus productos pueden llegar a presentar algunas sustancias peligrosas, entre ellas el cromo hexavalente (Cr (VI)) a pesar de que en el proceso de curtido solo se utilizan sales de cromo trivalente (Cr (III)). Estos estudios indican que el Cr (VI) presente en el cuero curtido, se origina por la oxidación del Cr (III) debido a la combinación de la presencia de oxígeno y la alteración del pH de las soluciones de curtido (Cao, 2021).

El uso de compuestos de cromo para curtir pieles puede provocar diferentes grados de afectación, por ejemplo, en términos de impacto ambiental se sabe que por cada pieza de piel que se curte se ocupa aproximadamente 1 m³ de agua y por cada tonelada de piel a curtir se pueden llegar a utilizar hasta 500 kg de sales de cromo, lo que genera grandes volúmenes de descargas de aguas residuales industriales. Así también, las exposiciones crónicas a este contaminante originan deterioros a la salud de los trabajadores de este sector (Barzallo et al., 2019; Hernández, 2022).

Como se ha mencionado el Cr (VI) no solo se genera por la industria curtidora, sino también por otros sectores productivos donde el metal es agregado en el proceso, se sabe por ejemplo que se puede llegar a incorporar hasta un 12% de Cr (VI) mediante procesos de electrodeposición para producir piezas cromadas, para la fabricación de pinturas antioxidantes, colorantes, conservadores de madera y catalizadores químicos. Cada año se pueden llegar a extraer hasta 14.4 millones de

toneladas de cromo en forma de cromita (Antúñez, 2014).

El Cr (VI) puede ingresar en el cuerpo humano vía digestiva, dérmica y respiratoria, durante su ingesta, puede causar un cuadro intestinal en forma de vómito, dolor abdominal, diarrea y hemorragias intestinales. De forma cutánea, puede causar dermatitis y úlceras. Y la exposición respiratoria de los gases de este metal se relaciona con cuadros de bronquitis, asma, ulceraciones y perforaciones del tabique nasal (Cárdenas-González et al., 2011). La exposición prolongada a este contaminante y sus derivados es causa de alteraciones del funcionamiento del hígado, afecciones al riñón, al sistema urinario y también puede ser detonador en la generación de neuropatías, estudios recientes ponen de manifiesto la relación que existe entre el Cr (VI) y la aparición de distintos tipos de cáncer, esto se debe en gran medida al estrés oxidativo causado por el contaminante, ya que los iones metálicos de transición como el Cr (VI) al reducirse a Cr (III) en el interior celular, pueden originar especies reactivas de oxígeno las cuales generan daños irreversibles al material genético (Becerra et al., 2014; García, 2019).

Debido a esto es que se han desarrollado distintas tecnologías físicas y químicas para la remoción del contaminante en el ambiente y llevar las concentraciones del Cr (VI) a parámetros admisibles por la normatividad ambiental vigente, estas técnicas parten de las propiedades fisicoquímicas de los metales y del medio afectado para transformar, inmovilizar o separar los metales. Por ello las soluciones actuales de remediación de los iones metálicos requieren de una fuerte inversión y de un gran avance tecnológico (Mejía, 2006). En la actualidad, los métodos fisicoquímicos más empleados para la eliminación de iones de Cr (VI) se enfocan en realizar una reducción del contaminante a

iones de Cr (III), los cuales representan su forma menos tóxica y menos soluble para posteriormente separarlos mediante una precipitación química. Algunos de estos métodos son; la estabilización fisicoquímica, extracción con ácido clorhídrico, el lavado de suelo con agentes extractantes, la adición de sustancias orgánicas e inorgánicas al suelo contaminado, la desorción térmica a temperaturas entre 320 y 560 °C, la inyección de solidificantes y la vitrificación, estas últimas dos técnicas son solo métodos de contención (Ortiz et al., 2007). Estos métodos resultan efectivos para remover el contaminante, sin embargo, pueden originar subproductos que pueden llegar a ser más tóxicos que el contaminante original, además al ser más costosos las empresas que desean apegarse a la normatividad ambiental no pueden costearlos y desisten de su aplicación (Meneses-Barroso et al., 2018).

Los valores establecidos en México para el Cr (VI) se pueden consultar en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2007), donde se indica una concentración de referencia total para el cromo hexavalente en suelos de uso industrial de 510 mg/kg. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud establece un valor de 100 mg/kg de cromo en suelo (Ogundele et al., 2015), mientras que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) establece un valor de referencia de 50 mg/kg de cromo en suelo (EPA, 2015), valores muy por debajo de lo que establece la normatividad ambiental mexicana.

Debido a ello, es que se han desarrollado otro tipo de tecnologías más asequibles y que no generan subproductos, conocidos como tratamientos biológicos, el más conocido es la biorremediación o biorrecuperación, donde se aprovecha la actividad metabólica de organismos vivos para reducir la

concentración y toxicidad en ambientes contaminados, estas tecnologías son menos invasivas con el ambiente y más económicos. Cuando los seres vivos empleados en los tratamientos biológicos son especies vegetales, el proceso se denomina fitorremediación, aunque también es conocida como fitolimpieza o fitocorrección, esta técnica se puede aplicar a suelos y a sistemas acuáticos para eliminar distintos tipos de contaminantes sean orgánicos o inorgánicos (Chiriví et al., 2019).

El propósito de la fitorremediación consiste en reducir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, de suelos, sedimentos, agua y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas, es una tecnología rentable, eficiente, novedosa, no invasiva y con una buena aceptación pública. La fitorremediación es un área de investigación activa actual, explorando nuevas especies vegetales hiperacumuladoras de metales pesados e incorporando la fitorremediación en trenes de tratamiento o en combinación con otras técnicas para generar técnicas híbridas.

La fitorremediación es una tecnología relativamente nueva pero que ha resultado ser sumamente efectiva para descontaminar suelo, agua e incluso aire, tiene una buena aceptación pública al ser menos invasiva que otras técnicas. Cada año se identifican nuevas especies de plantas con la capacidad de atrapar o acumular metales pesados. Una de las áreas actuales de investigación de la fitorremediación radica en combinarla con otras técnicas de remoción para crear técnicas híbridas de tratamiento (Medina-García et al., 2019). En el estudio realizado por Villen-Guzmán et al., (2020), los autores afirman que la caracterización del suelo es de suma importancia para determinar el enfoque de tratamiento más apropiado.

En el caso de suelos con una baja conductividad hidráulica, no es viable el uso de técnicas fisicoquímicas. Para este tipo de suelos, la técnica de electrorremediación también llamada electrocinética, es la mejor opción. Esta técnica consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad a un par de electrodos insertados en el suelo contaminado que funcionan como polos positivo y negativo, generando un flujo de corriente a través del cual se movilizan hacia el ánodo o el cátodo, el agua, iones y partículas contaminantes con cargas positivas y negativas presentes en el suelo donde posteriormente son separadas. Estas técnicas son especialmente adecuadas para eliminar metales solubles o que están en el suelo en forma de complejos óxidos, hidróxidos y carbonatos (Cameselle & Gouveia, 2018).

Los mecanismos de transporte que ocurren debido a la presencia de un campo eléctrico inducido son la migración de iones, la electroforesis de sólidos coloidales y la electroósmosis en masa de una solución de lavado. En la práctica los electrodos utilizados, abarcan la totalidad del sitio contaminado, con una separación entre ellos, entre 2 y 10 metros e insertados a profundidades de hasta 20 metros, generalmente se usan diferenciales de potencial de entre 40 y 200 V (Antúnez, 2014). En los últimos años se ha comenzado a desarrollar tecnologías híbridas para el tratamiento de suelos contaminados. Estas tecnologías combinan la técnica de electrorremediación con alguna otra variante tecnológica, por ejemplo, con la biorremediación, bioestimulación, bioaumentación o la fitorremediación, buscando con ello mejorar o complementar la capacidad de remoción de las técnicas por separado (Alvarado et al., 2015).

El objetivo de esta investigación radicó en evaluar la técnica de electrofitorremediación con diferentes concentraciones de Cr (VI),

con una corriente de bajo voltaje y una planta nativa del sitio de estudio y compararla con las técnicas por separado (fitorremediación y electrorremediación) a las mismas condiciones de tratamiento.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio se ubicó en el Parque Industrial Ecológico de León, también conocido como Parque P.I.E.L., este se encuentra en el libramiento carretero León – Aguascalientes, C.P. 37490, en la ciudad de León, Guanajuato, en este parque industrial se concentra la mayor parte de las empresas curtidoras de la ciudad de León, Guanajuato. En la Tabla 1 se muestran las coordenadas del sitio.

Tabla 1. Coordenadas de la zona de estudio en León, Gto.

Coordenadas	
Latitud	21.082646 °
Longitud	-101.716395 °
Elevación	1,778 msnm

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Muestreo de suelo

Esta etapa del estudio atendió a la necesidad de evaluar las características fisicoquímicas del suelo, determinar la presencia y concentración del Cr (VI) y de obtener material de trabajo para las tres técnicas a comparar. El procedimiento se realizó siguiendo el protocolo descrito en la NMX-AA-132-SCFI-2016 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2016). Se realizó un muestreo compuesto, para esto se tomaron 5 muestras simples de 3 kg cada una, considerando una profundidad de 10 cm a partir de la superficie. La muestra representativa se obtuvo mezclando el conjunto de las muestras simples, las coordenadas de cada uno de los puntos de muestreo fueron tomados con la aplicación móvil GPS Data ® (GPS Data, 2018) y se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas de los puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Longitud	Latitud
1	-101.717368 °	21.085401 °
2	-101.717294 °	21.084670 °
3	-101.717683 °	21.084845 °
4	-101.718180 °	21.085026 °
5	-101.718022 °	21.084305 °

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Recolección e identificación de plantas en el área de estudio.

Se realizó una recolección de las especies de flora presentes en el área de estudio, para su aplicación en las técnicas de fitorremediación y electrofitorremediación, se consideró la planta de mayor abundancia en la zona como especie vegetal seleccionada. Las plantas fueron extraídas con todo y raíz, y se colocaron en macetas de plástico de 10 cm de diámetro por 9 cm de alto.

Para la identificación de la planta recolectada del sitio, se utilizó la aplicación móvil de reconocimiento vegetal PlantSnap® la cual se puede descargar de cualquier tienda de aplicaciones para móviles, para su uso, solo se necesita una fotografía de buena resolución y una conexión estable a internet, esta aplicación proporciona información referente a la planta: nombre común, nombre científico, altura y características en general (PlantSnap, 2017).

2.4 Análisis de fertilidad del suelo.

Para los análisis de la fertilidad del suelo recolectado, se envió un kilogramo de este a un laboratorio certificado y especializado en análisis de suelos, con la finalidad de conocer el grado de fertilidad del suelo, la conductividad hidráulica, así como la caracterización fisicoquímica del mismo y determinar la presencia del contaminante, el

laboratorio seleccionado para ello fue Fertilab®, ubicado en la ciudad de Celaya, Guanajuato.

2.5 Determinación del potencial hidrógeno (pH) y humedad.

La determinación de estos parámetros fisicoquímicos se realizó en base al procedimiento descrito en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007), la cual establece los criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación. La medición del pH se realizó al suelo al finalizar el periodo de tratamiento de cada uno de los sistemas aplicados, fitorremediación (FR), electrorremediación (ER), electrofitorremediación (EF).

2.6 Determinación colorimétrica de cromo hexavalente en suelo.

Para determinar la presencia de Cr (VI) en el suelo recolectado se utilizó el procedimiento indicado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007); para ello se usaron 2.5 gr de suelo, se realizó un tratamiento previo de digestión alcalina a la muestra, este es un método que consiste en la extracción del Cr (VI) en su forma soluble, adsorbida y precipitada de compuestos de cromo en suelos; una vez que el cromo ha sido separado de las partículas de suelo, se determina colorimétricamente mediante una reacción con difenil carbazida en solución ácida, desarrollando una coloración rojo-violeta en las muestras con la presencia del metal, enseguida se midió la absorbancia a 540 nm mediante un espectrofotómetro BEL-LGS53®, este procedimiento se empleó en los análisis de los procesos de electrorremediación,

fitorremediación y electrofitorremediación para determinar la concentración final de Cr (VI).

2.7 Diseño de los tratamientos de remediación.

Se establecieron tres tratamientos distintos; fitorremediación (FR), electrorremediación (ER) y la combinación de ambos denominada electrofitorremediación (EFR) a tres diferentes concentraciones de Cr (VI): 140, 395 y 620 mg/kg tomando como referencia la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007), en la cual se establece que para suelo de uso industrial la concentración límite de Cr (VI) debe de ser de 510 mg/kg, por lo que se establecieron valores debajo, cercanos y sobre el valor de referencia, se usaron tres repeticiones para cada concentración además del control; se prepararon tres soluciones de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) como fuente de Cr (VI), a 140, 395 y 620 ppm, todos los tratamientos se aplicaron en 400 gr de suelo colocados en

recipientes de plástico con capacidad aproximada de 500 mL, el suelo fue previamente tamizado y humectado con las soluciones de $K_2Cr_2O_7$.

2.8 Tratamientos electrocinéticos.

Para los tratamientos electrocinéticos (ER y EFR) se utilizaron como electrodos placas de grafito de 6 x 3 x 1 cm, con una distancia de separación entre ellos de 8 cm e insertados en el suelo a tratar a una profundidad de 3.5 cm, se aplicó una corriente de 20 V durante 24 horas con el apoyo de una fuente de poder de corriente directa KEYSIGHT®, el voltaje utilizado se estableció en base a la consulta de literatura donde se remediaba una cantidad similar a 400 gr de suelo pero tratando otros metales pesados como el plomo, cadmio y arsénico (Hernández et al., 2010). El periodo de tratamiento fue de 28 días y los análisis de la determinación de Cr (VI) se realizaron una vez por semana, los tratamientos utilizados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Descripción de los tratamientos utilizados.

Control	Tratamiento	Descripción	Concentraciones iniciales		
			140 mg/kg	395 mg/kg	620 mg/kg
Ctrl	FR	Plantas sin Electroodos	FR1/140	FR1/395	FR1/620
			FR2/140	FR2/395	FR2/620
			FR3/140	FR2/395	FR3/620
	ER	Electrodos sin Plantas	ER1/140	ER1/395	ER1/620
			ER2/140	ER2/395	ER2/620
			ER3/140	ER2/395	ER3/620
	EFR	Plantas y Electroodos	EFR1/140	EFR1/395	EFR1/620
			EFR2/140	EFR2/395	EFR2/620
			EFR3/140	EFR2/395	EFR3/620

Los términos FR, ER y EFR significan respectivamente: fitorremediación, electrorremediación y electrofitorremediación, los números que acompañan a estos términos indican la repetición y la concentración respectivamente, para el control solamente se usó la tierra que fue recolectada del sitio sin la adición extra de Cr (VI).

Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

3.1 Identificación de flora en el área de estudio

Los resultados de la identificación de plantas con la aplicación móvil PlantSnap® mostraron que se trataba de la especie

Solanum elaeagnifolium Cav., o comúnmente conocida como trompillo, buena mujer, pera o tomatito de buena mujer; puede ser una maleza dañina en muchos cultivos, sin embargo, se considera como un componente atractivo de la vegetación a orillas de carretera en regiones áridas del país, es

común encontrarla en el centro de Estados Unidos, al centro de México y en Sudamérica (Hanan et al., 2009).

S. elaeagnifolium, es una planta perenne de 20 a 50 cm de alto, sus hojas tienen el borde ondulado, produce bayas con semillas discoides, aplanadas, parduzcas, de unos 4 mm de diámetro (Departamento de Botánica-Instituto de Biología, 2019). En una investigación realizada por Trejo et al., (2009), se determinó que *S. elaeagnifolium* tiene la capacidad de extraer cadmio y plomo en suelos contaminados con estos metales, con lo que queda de manifiesto su capacidad fitorremediadora.

3.2 Fertilidad del suelo.

Los resultados brindados por el laboratorio Fertilab® (2020), indican que el suelo recolectado posee un contenido medio de

materia orgánica, un alto suministro en fósforo, altos niveles en calcio, moderadamente alto en potasio, un nivel medio en magnesio y un contenido moderadamente alto de azufre. En cuanto a la disponibilidad de micronutrientes, los resultados indican que el suelo tiene niveles medios de hierro disponible, muy bajo en zinc, bajo en manganeso, moderadamente alto en el contenido de cobre y bajo en boro, por lo que es recomendable su aportación en caso de que se desee utilizar para cultivo, los resultados detallados se muestran en la Tabla 4. Estos valores fueron obtenidos mediante el procedimiento descrito en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). En cuanto a su conductividad hidráulica, esta fue de 3.90 cm/h, lo que demuestra que posee una conductividad media, esto indica que es viable el uso de técnicas electrocinéticas para la remoción del metal.

Tabla 4. Resultados de los análisis de fertilidad del suelo, se muestran la cantidad de los nutrientes presentes en el suelo, así como su interpretación (Fertilab, 2020).

Determinación	Resultado	Unidad	Interpretación
Materia orgánica	2.20	%	Medio
Carbonatos totales	1.06	%	Muy bajo
Salinidad (CE Extracto)	0.95	dS/m	Bajo
P-Bray	53.7	ppm	Alto
K	440	ppm	Moderadamente alto
Ca	4263	ppm	Alto
Mg	397	ppm	Medio
Na	158	ppm	Moderadamente bajo
Fe	10	ppm	Medio
Zn	0.13	ppm	Muy bajo
Mn	2.36	ppm	Bajo
Cu	1.41	ppm	Moderadamente alto
B	0.68	ppm	Bajo
S	16.4	ppm	Moderadamente alto
N-NO ₃	33.5	ppm	Moderadamente alto

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la presencia de metales pesados, los resultados indican que el suelo analizado presenta una concentración de 85.214 mg/kg de Cr (VI), una concentración muy por debajo a lo que establece el valor indicado en la normatividad nacional, que es de 510 mg/kg, más sin embargo no debería de estar presente en el suelo recolectado ya que el sitio de

muestreo está ubicado a una distancia de aproximadamente 300 metros de la empresa curtidora más cercana. Para determinar la presencia de metales pesados en suelo, se utilizó el método 6010C (SW-846), descrito por la EPA (2007), la cual se basa en el uso de espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (ICP-AES).

3.3 Potencial hidrógeno (pH) y humedad.

El primer parámetro evaluado fue el pH, los resultados indican que el suelo es ligeramente alcalino. Al finalizar los tratamientos de fitorremediación (FR), electrorremediación (ER) y electrofitorremediación (EFR); se

puede apreciar una tendencia de reducción del pH en los tratamientos de FR y ER, mientras que en la EFR se ve un ligero aumento en los tratamientos a concentraciones de 140 y 620 mg/kg, sin embargo, el suelo sigue presentando un carácter alcalino. Estos resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del pH al finalizar los tratamientos de remediación aplicados.

pH inicial sin tratamiento	Carácter inicial del suelo	Tratamiento	Concentración de Cr (VI) (mg/kg)	pH final promedio	Carácter final del suelo
8.96		FR	140	8.31	Alcalino
			395	8.70	
			620	8.69	
8.51	Alcalino	ER	140	8.49	Alcalino
			395	8.31	
			620	8.02	
7.96		EFR	140	9.07	Alcalino
			395	7.79	
			620	8.54	

Los términos FR, ER y EFR significan respectivamente: Fitorremediación, Electrorremediación y Electrofitorremediación.

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Determinación de cromo final en los tratamientos.

Los resultados de la concentración final de Cr (VI) se muestran en la Tabla 6, se puede apreciar que en los tres tratamientos aplicados hubo una disminución en la concentración final del contaminante, sin embargo, para el tratamiento de fitorremediación (FR) se nota

una reducción menor a comparación de los tratamientos electrocinéticos (ER y EFR) donde la reducción del contaminante fue mucho mayor, de estos dos tratamientos, en la electrofitorremediación se aprecia una reducción más evidente del contaminante en rangos de un 70 a casi un 90% para todas las concentraciones del contaminante (140, 395 y 620 mg/kg).

Tabla 6: Resultados de las concentraciones finales de Cr (VI) en cada uno de los tratamientos aplicados.

Tratamiento	Concentración inicial (mg/Kg)	Concentración promedio final en base seca (mg/Kg)	Porcentaje de reducción (%)
Control	85.214	85.20	0.01
	140	107.74	23.04
	395	339.73	13.99
FR	620	561.37	9.46
	140	46.25	66.96
	395	47.2	88.05
ER	620	108.48	82.5
	140	40.65	70.96
	395	64.79	83.60
EFR	620	73.66	88.12

Los términos FR, ER y EFR significan respectivamente: Fitorremediación, Electrorremediación y Electrofitorremediación.

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados de la determinación de Cr (VI) del suelo recolectado en el Parque Industrial Ecológico de León, indican la presencia del contaminante, si bien es menor al valor de referencia indicado en la normatividad mexicana, se debe recalcar que el sitio de donde fue tomada la muestra de suelo, a pesar de estar dentro del polígono del parque industrial; no hay ninguna empresa establecida en el lugar y la empresa curtidora más cercana al sitio de muestreo se encuentra aproximadamente a 300 metros de distancia, por lo que no debería de estar presente el metal o debería estarlo pero en una concentración mucho menor; en sus inicios el parque fue concebido para ubicar a las empresas curtidoras del municipio y controlar los residuos tóxicos generados, pero en su planeación no se consideró que el proceso de curtido sigue siendo principalmente artesanal y los curtidores desconocen las nuevas tecnologías y los procesos aplicados al sector donde generen menos contaminantes.

La presencia del metal en las muestras de suelo podría explicarse por el proceso productivo del curtido de la piel, ya que uno de los pasos de este proceso consiste en secar la piel después de lavarla con sales de cromo para reducir la humedad y evitar la descomposición bacteriana de la piel. Las pieles son secadas al sol, para ello los trabajadores tienden las pieles directamente en el suelo en un terreno aledaño a la empresa y por fenómenos de migración el metal ha terminado en el sitio de muestreo, se sabe que la movilidad del metal depende de las características de sorción del suelo así como de su pH; en general, la movilidad de los metales pesados en el suelo es baja a pH alcalinos, situándose en los primeros centímetros del suelo, otra posible explicación a la presencia del metal puede deberse a las descargas clandestinas de agua

residual industrial con presencia del contaminante en el Arroyo el Granizo, ya que este cuerpo de agua es limítrofe al sitio de muestreo y al parque industrial, por lo que estas aguas se estarían infiltrando al mismo, se sabe que este arroyo tiene la presencia del contaminante afectando a productores agrícolas de la región que hacen uso del agua de este afluente.

Las concentraciones tan pequeñas del metal pudieran indicar que la presencia de plantas y/o microorganismos nativos y las condiciones propias del lugar inciden en que los niveles de la concentración de Cr (VI) se mantengan en concentraciones mínimas al estar llevando a cabo un proceso de recuperación pasiva. En base a los resultados obtenidos en este estudio se puede deducir que los procesos electrocinéticos de remoción de contaminantes son más adecuados para la remoción de Cr (VI) tanto para concentraciones bajas, medias y altas del metal, mientras que los procesos biológicos, que aunque también mostraron una reducción del contaminante, fue menor en comparación con los tratamientos electrocinéticos aplicados en este estudio; por lo que también resultan adecuados si es que se tiene contemplado realizar un plan de tratamiento a largo plazo.

La mayoría de los metales están disponibles a un pH ácido porque no son tan fuertemente adsorbidos por la matriz del suelo, sin embargo, metales como el Cr, As, Mb y Se son más susceptibles a la biodisponibilidad a un pH alcalino, incrementándose la adsorción del metal. Todos los tratamientos aplicados en este estudio mantuvieron el carácter alcalino del suelo, aunque hubo una ligera modificación en el valor de pH al finalizar cada tratamiento, esto puede deberse a la reacción de oxidación del agua presente en el suelo, generando protones H^+ en el ánodo que se mueven hacia el cátodo provocando un

frente ácido, pero sin alterar significativamente el carácter alcalino del suelo tratado manteniendo la biodisponibilidad del metal.

Se infiere que al aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad en combinación con *S. elaeagnifolium* Cav., se estimula la remoción del metal por fenómenos de migración electrocinética hacia los electrodos y su posterior electrodeposición en estos, las concentraciones remanentes del metal, que aún quedaron presentes en el suelo tratado; fueron removidos posteriormente por la planta posiblemente por procesos de bioacumulación; ya que al aplicar una corriente eléctrica se favorece la apertura de poros en la pared celular de las células vegetales, permitiendo con ello el ingreso de los iones de Cr (VI) al interior de las células favoreciendo su acumulación e incidiendo directamente en la remoción del contaminante.

En otros estudios donde la técnica de electrofitorremediación fue aplicada para eliminar el cromo hexavalente pero con el uso de otras especies vegetales, entre ellas *Brassica rapa*, *Phalaris canariensis*, *Zea mays*, *Lolium perenne* L., avena y girasol (Chirakkara et al., 2015; Romero, 2018; Cameselle et al., 2019, Cameselle et al., 2021, Sailesh et al., 2023), se logró una reducción de la concentración del metal pero en menor proporción que con el uso de *S. elaeagnifolium* Cav., algo a resaltar de dichas investigaciones, es que las plantas utilizadas fueron plantadas y crecidas en sustratos nutritivos y posteriormente trasplantadas a suelos con la presencia de cromo hexavalente, por lo que no estaban adaptadas al contaminante, a diferencia de este estudio donde las plantas fueron recolectadas de un parque industrial donde el giro de las empresas es la curtiembre de la piel, por lo que ya presentaban un alto grado de adaptabilidad al contaminante. Otro aspecto

para considerar fue el voltaje utilizado, en esos estudios el voltaje aplicado fue menor en comparación con esta investigación, lo que pudo influir en una baja migración de los iones y en una menor bioacumulación. Por lo tanto, se deduce que el uso de plantas adaptadas a la presencia del contaminante y combinado con un campo eléctrico de 20 V y con menores tiempos de tratamiento permite alcanzar remociones del contaminante a valores inferiores a los indicados por la normativa ambiental mexicana e incluso por debajo de los valores establecidos por la Organización Mundial de la Salud y por la Agencia de Protección Ambiental.

Con este estudio se comprobó que *S. elaeagnifolium* Cav. posee la capacidad de tolerar distintos rangos de concentraciones de Cr (VI) incluso muy por arriba de los límites de referencia máximos, del mismo modo se comprueba que la técnica híbrida de electrofitorremediación resultó ser más idónea para la remoción del contaminante que está presente en suelos, con lo cual se podrán establecer métodos de tratamientos híbridos in situ a suelos contaminados con este metal pesado.

5. Conclusiones

La presencia de metales pesados en diferentes entornos es un problema no solo a nivel local sino también a nivel nacional, lo que puede derivar en daños a la salud pública y problemas ambientales. El Cr (VI) tiene la particularidad de que no permanece en la atmósfera, sino que se concentra en suelo y agua, lo que afecta las cadenas productivas que utilizan estos recursos. Debido a lo anterior, es necesario el desarrollo de tecnologías adecuadas, asequibles y probadas que permitan la remoción del metal en condiciones controladas. Este estudio demuestra la aplicación de nuevas técnicas de remediación de suelos para eliminar Cr (VI), las cuales se basan en la remoción del metal

pesado por parte de *S. elaeagnifolium* Cav. en combinación con técnicas electrocinéticas que resultan en la electrodeposición del contaminante en los electrodos utilizados. Los resultados experimentales descritos en este estudio señalan que la técnica híbrida de electrofitorremediación es una alternativa viable para la remoción de Cr (VI) y que podría aplicarse con éxito para la remoción de otros metales pesados presentes en el suelo. Este estudio también muestra que las técnicas electrocinéticas pueden aplicarse de forma ex situ, con lo que podrá escalarse el proceso para aplicarse in situ, con cantidades más grandes de suelo contaminado con Cr (VI), por períodos más largos o para otro tipo de metales pesados que pudieran estar presente en suelos industriales.

6. Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecemos al Tecnológico Nacional de México y al Gobierno del Estado de Guanajuato por contribuir económicamente para que este proyecto pudiera llevarse a cabo a través de la Convocatoria TecNM 2020: Proyecto de Investigación Científica. Modalidad: Por Licenciatura.

7. Referencias

1. Abraham-Covarrubias, S., & Peña-Cabiales, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(esp01): 7–21. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.esp01.01>
2. Alvarado, J., Navarro, K., Terán, K., & Vizcarra, C. (2015). Electrobiorremediación, una técnica innovadora para la limpieza de suelos contaminados. *EPISTEMUS*, 9(18): 96–99. <http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/18-ELECTROBIORREMEDIACION.pdf>

3. Antúñez, D. X. (2014). Fundamentos de química ambiental. Volumen II (1a ed., Vol. 2). SINTESIS. pp.356
4. Barzallo, D., Parada, M., Puente, C., Carrera, C., & Ramos, J. (2019). Desarrollo de una formulación para la curtición de piel caprina con ácido húmico y tara. *Perfiles*, 2(22): 78–86. http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11209/1/per_n22_v2_03.pdf
5. Becerra, S., Soria, C., Jaramillo, F., & Moreno, J. (2014). Trastornos a la salud inducidos por cromo y el uso de antioxidantes en su prevención o tratamiento. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy*, 2(2): 19–30. <https://www.redalyc.org/pdf/4960/496050267001.pdf>
6. Cameselle, C., & Gouveia, S. (2018). Métodos para el tratamiento de suelos contaminados (Vol. 1) [Libro electrónico]. En Fundición. Recuperado 22 de junio de 2022, de <https://www.unescosost.org/post/riartas>
7. Cameselle, C., Gouveia, S. & Cabo, A. (2021). Sustainable Phytoremediation of Soils Enhanced with Electric Field. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00278-7>
8. Cameselle, C., Gouveia, S., & Urréjola, S. (2019). Benefits of phytoremediation amended with DC electric field. Application to soils contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, 229, 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.222>
9. Cao, I. (2021, 29 octubre). Diferentes tipos de curtidos. *Panuncio*. <https://panuncio.com/blogs/news/diferentes-tipos-de-curtidos>
10. Cárdenas-González, J. F., Martínez-Juárez, V. M., & Acosta-Rodríguez, I.

- (2011). Remoción de Cromo (VI) por una cepa de *Paecilomyces* sp Resistente a Cromato. *Información tecnológica*, 22(4): 43–50. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000400006>
11. Carrillo, G., Azamar, A., & Torre-Marín, G. C. (2017). Innovación tecnológica y curtiduría en el estado de Guanajuato. *Economía Informa*, 402: 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2017.01.005>
12. Chirakkara, R. A., Reddy, K. R. & Cameselle, C. (2015). Electrokinetic Amendment in Phytoremediation of Mixed Contaminated Soil. *Electrochimica Acta*, 181, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.01.025>
13. Chiriví, J., Fajardo, C., Gómez, L., & Delgado, S. (2019). Biorremediación de metales pesados [Libro electrónico]. En *Revisión y panorama nacional de la biorremediación microbiana* (pp. 50–62). Recuperado 6 de julio de 2022, de <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/bo/article/view/3721/3742>
14. Departamento de Botánica-Instituto de Biología. (2019), *Solanum elaeagnifolium* Cav., ejemplar de: Herbario Nacional de México (MEXU), Plantas Vasculares. En Portal de Datos Abiertos UNAM (en línea), México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://datosabiertos.unam.mx/IBUNAM:ME XU:183014>
15. Dussel, E., & Cárdenas, H. (2018). Condiciones y Retos del segmento del cuero para incrementar el valor agregado de las exportaciones de la Cadena del Calzado en México. Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato. https://www.ciceg.org/pdf/RetosdelSector_baja.pdf
16. EPA. (2015). Regional Screening Level (RSL) Composite Worker Soil Table (TR=1E-6, HQ=1) [Conjunto de datos]. https://archive.epa.gov/region9/superfund/web/pdf/indsoil_sl_table_run_june2015.pdf
17. EPA. (2007). "Method 6010C (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry," Revision 3. <https://19january2017snapshot.epa.gov/home/eland-security-research/epa-method-6010c-sw-846-inductively-coupled-plasma-atomic-emission.html>
18. Fertilab®. (2020). Informe de resultados: Diagnostico de la fertilidad del suelo. Celaya, Guanajuato, México
19. García, M. (2019). Polifenoles y vitaminas en la protección del daño genético inducido por metales con potencial cancerígeno. *Nutrición Clínica en Medicina*, XIII (3): 129–139. <https://doi.org/10.7400/NCM.2019.13.3.5078>
20. GPS Data (1.4.7). (2018). [Aplicación Móvil]. Propane apps. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.exatools.gpsdata&hl=es> 419
21. Hanan, A., Vibrans, H., & Tenorio, P. (2009, 13 agosto). *Solanum elaeagnifolium* - ficha informativa. <http://www.conabio.gob.mx/>. Recuperado 11 de agosto de 2022, de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/solanaceae/solanum-elaeagnifolium/fichas/ficha.htm>
22. Hernández, A. P. M. (2022). Ambientalismo: El río y la contaminación que arrastran sus aguas. *Tribuna de Querétaro*. <https://tribunadequeretaro.com/informacion/sjr/ambientalismo-el-rio-y-la-contaminacion-que-arrastran-sus-aguas/>

23. Hernández, L., Ramírez, M. V., & Cruz, V. L. (2010). Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos. *Superficies y vacío*, 24(1), 24-29. https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/123456789/7716/1/SV2412411_2.pdf
24. Hernández, V., & Contreras, J. (2022). Las pieles en León se trabajan con las manos y el corazón. El Sol de León | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, Guanajuato y el Mundo. Recuperado 7 de julio de 2022, de <https://www.elsoldeleon.com.mx/local/las-pieles-en-leon-se-realizan-con-las-manos-y-el-corazon-oficio-que-representa-anos-de-tradicion-familiar-8393993.html>
25. Martínez-Buitrago, S. Y., & Romero-Coca, J. A. (2017). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 26(1). <https://doi.org/10.18359/rfce.2357>
26. Medina-García, L., Ferreira, F. P., Kurita-Oyamada, H. G., Rodríguez-Bonet, S., Fidel-Galeano, E., & Viera, M. R. (2019). Phytoremediation of chrome in tannery effluents using *Eichhornia crassipes*. *Reportes científicos de la FACEN*, 10(1): 25–36. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.1.25>
27. Mejía, G. (2006). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 1(1): 77–99. <https://www.redalyc.org/pdf/3214/321428096010.pdf>
28. Meneses-Barroso, Y. M., Patiño-Mantilla, P. A., & Betancur-Pérez, J. F. (2018). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina* sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(1): 141–152. <https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
29. Ogundele, D. T., Adio, A. A. & Oludele, O. E. (2015). Heavy Metal Concentrations in Plants and Soil along Heavy Traffic Roads in North Central Nigeria. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 05(06). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000334>
30. Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., & Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. En Vigilancia Tecnológica (VT.6). Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía. Recuperado 26 de enero de 2023, de http://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf
31. Ortiz-Gutiérrez, L. J., Soto-Simental, S., Zepeda-Bastida, A., Ocampo-López, J., & Ayala-Martínez, M. (2021). Uso de *Dalbergia palo-escrito* como alternativa vegetal para el curtido de la piel de conejo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3). <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.2967>
32. PlantSnap (5.00.09.). (2017). [Aplicación Móvil]. PlantSnap Inc. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.fws.plantsnap2&hl=es_MX&gl=US
33. Romero, J. (2018). Fitorremediación y electrorremediación de suelos contaminados [Tesis de licenciatura]. Universidad de Vigo. <http://calderon.cud.uvigo.es/bitstream/handle/123456789/249/Romero%20Roquette%2c%20Juan%20memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

34. Sailesh, A. R., Riyazuddin, S., Kumar, K. S., Chakraborty, A., & Namuduri, S. (2023). Application of Electroremediation Coupled with Phytoremediation Techniques for the Removal of Trace Metals in Sewage Sludge. *Phytoremediation*, 129-144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17988-4_7
35. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2016). NMX-AA-132-SCFI-2016: Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-132-scfi-2016.pdf>
36. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0
37. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: Que establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
38. Trejo, R., Esquivel, O., Pedroza, A., Arreola, J., Flores, A., Ruiz, J., & Valdéz, R. (2009). Evaluación de trompillo (*Solanum elaeagnifolium*) en la fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 8: 247–253. <https://docplayer.es/30993774-Evaluation-of-trompillo-solanum-elaeagnifolium-for-fitoextraction-of-lead-and-cadmium-in-contaminated-soil.html>
39. Villen-Guzmán, M., Cerrillo-González, M., Paz-García, J., Vereda-Alonso, C., Gómez-Lahoz, C., & Rodríguez-Maroto, J. (2020). Remediación electrocinética de un suelo real contaminado con plomo asistida con la adición de un agente complejante. *Química Nova*, 43(8), 1078–1085. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170585>