



## Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” Ayacucho, utilizando la alfalfa (*Medicago sativa*).

Removal of heavy metals from biosolids of the “La Totora” wastewater treatment plant in Ayacucho, using alfalfa (*Medicago sativa*).

 [Huallpa-Vargas, Herlis Sergio<sup>1</sup>](#)

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

Recibido: 17 Sep. 2024 | Aceptado: 18 Sep. 2024 | Publicado: 07 Ene. 2025

Autor de correspondencia\*: [herlissergio1993@gmail.com](mailto:herlissergio1993@gmail.com)

**Cómo citar este artículo:** Huallpa-Vargas, H.S. (2024). Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” Ayacucho, utilizando la alfalfa (*Medicago sativa*). *Revista Científica Aypate*, 3(4), 55–73. <https://doi.org/10.57063/ricay.v3i4.122>.

### RESUMEN

La investigación desarrollada permitió evaluar el grado de remoción utilizando alfalfa (*Medicago sativa*) en la remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”. Se empleó un diseño metodológico aplicativo con enfoque explicativo y diseño experimental completamente randomizado. Se determinó la concentración inicial de metales pesados en los biosólidos por la técnica de (ICP-OES), siendo para el cromo 320,7 mg/kg, para cadmio 7,3 mg/kg y plomo de 37,7 mg/kg. Se sembró alfalfa con tres densidades diferentes empezando con la variedad "Master10", "Moapa" y "California". Así mismo, para el material de remoción se determinó el contenido de metales pesados siendo para el cromo de 257,7 mg/kg, cadmio 7,0 mg/kg y plomo 27,3 mg/kg y una vez culminada la remoción con la alfalfa, se logra reducir los niveles de contaminación especialmente con la variedad "California" a 25 kg/ha, removiendo cromo en un (43 %), cadmio (76 %) y plomo (71 %), estos dos últimos quedando por debajo de los límites máximos permisibles para uso agrícola. Se concluye que la alfalfa (*Medicago sativa*) sembrados en sistemas formuladas con biosólidos, permite remover metales pesados en tanto en la raíz como en el tallo y que puede ser aplicado en la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”.

**Palabras Clave:** Metales pesados, remoción, alfalfa y biosólidos.

### ABSTRACT

The research developed allowed to evaluate the degree of removal using alfalfa (*Medicago sativa*) in the removal of heavy metals from biosolids of the wastewater treatment plant "La Totora". An applicative methodological design with an explanatory approach and a completely randomized experimental design was used. The initial concentration of heavy metals in biosolids was determined by the (ICP-OES) technique, being 320.7 mg/kg for chromium, 7.3 mg/kg for cadmium and 37.7 mg/kg for lead. Alfalfa was planted at three different densities starting with the "Master10", "Moapa" and "California" varieties. Likewise, for the removal material, the heavy metal content was determined, being 257.7

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de atribución de Creative Commons, que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite debidamente la obra original.



mg/kg for chromium, 7.0 mg/kg for cadmium and 27.3 mg/kg for lead. Once the removal with alfalfa was completed, the contamination levels were reduced, especially with the "California" variety at 25 kg/ha, removing chromium (43%), cadmium (76%) and lead (71%), the latter two remaining below the maximum permissible limits for agricultural use. It is concluded that alfalfa (*Medicago sativa*) planted in systems formulated with biosolids, allows the removal of heavy metals in both the root and the stem and that it can be applied in the wastewater treatment plant "La Totorá".

**Keywords:** Heavy metals, removal, alfalfa and biosolids.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado un aumento significativo en la generación de biosólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel mundial. El enfoque adecuado para el tratamiento y manejo de estos residuos ha surgido como un tema de alto interés en todos los países. Es destacable que metales pesados como el Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cromo (Cr), Cobre (Cu) y Níquel (Ni) se han encontrado con frecuencia considerable en los biosólidos residuales.

Dentro de este contexto, la utilización de biosólidos residuales para enriquecer suelos agrícolas empobrecidos en nutrientes o degradados debido a la actividad humana se ha presentado como una solución pragmática y expedita para abordar la escasez de recursos esenciales. Esta estrategia, propuesta por (Hernández, et al., 2017), parece ofrecer una alternativa viable.

En la actualidad, en la planta de tratamiento de aguas residuales "la Totorá", la eliminación o recuperación de metales pesados de los biosólidos orgánicos no está siendo abordada ni evaluada de manera adecuada, principalmente debido a la asignación insuficiente de recursos financieros. Es importante destacar que la sostenibilidad de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, constituye aproximadamente el 60 % de los costos operativos totales del proceso de operación. (Aramburu & Trejo, 2021).

Gran cantidad de biosólidos se destina al campo de secado final de los biosólidos y esta son vendidas a los agricultores de las diferentes zonas para ser usado como abono en los cultivos, pero sin embargo estos biosólidos contienen metales pesados como cromo: cadmio, plomo y entre otros. Los agricultores por desconocimiento lo usan en dichos cultivos, por tanto, es necesario conocer las concentraciones de dichos metales en los biosólidos.

Uno de las técnicas o métodos para remover metales pesados es usando la planta nativa alfalfa (*Medicago sativa*), quien absorbe y acumula en sus raíces al metal pesado. La ventaja de usar alfalfa (*Medicago sativa*) es su fácil adquisición en la región y su bajo costo. (Giraldez, 2019).

Existen diferentes plantas que absorben metales pesados como: maíz, perejil y girasol que son consideradas como plantas excluidoras o estabilizadoras de metales pesados. (Munive, 2018).

El objetivo del trabajo de investigación es sobre la aplicación de la planta alfalfa (*Medicago sativa*) como material absorbente de metales pesados de los biosólidos residuales producidas en la planta de tratamiento de aguas residuales "la Totorá". En tal sentido, para ello se han instalado diferentes macetas experimentales con siembra de alfalfa (*Medicago sativa*), con diferentes variedades de planta y densidades de siembra; para evaluar la remoción de los

metales pesados, y de esta manera encontrar la variedad y densidad adecuado para la remoción.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Diseño de investigación

El diseño de este experimento fue completamente randomizado o al azar (DCR), para ello se ha utilizado tres macetas M1, M2 y M3 de la misma variedad de planta, pero de densidades diferentes de siembra y 2 macetas de variedades diferentes a una misma densidad. El área, la variedad y las densidades de siembra se muestran en la tabla 1. Se usaron semillas de la variedad master10, donde estas fueron instaladas respetando y cumpliendo el protocolo de las buenas prácticas agrícolas y se ha evaluado la fitoextracción con la ayuda de alfalfa a los metales pesados de diferentes densidades de la biomasa tanto menor, medio y mayor con dicha planta fitoextractora. Previamente se ha realizado tomas de muestras de los biosólidos antes y después de la cosecha, para su análisis químico instrumental por ICP-OES. El tiempo para la cosecha de alfalfa (*Medicago sativa*), se ha llevado a cabo al sexto mes después del sembrado, finalmente se procedió a la deshidratación de las muestras para su correspondiente análisis.

**Tabla 1.**

*Características de las macetas experimentales*

	Macetas A			Macetas B	
	M1	M2	M3	M4	M5
<b>Área</b>	0,0269 m <sup>2</sup>	0,0269 m <sup>2</sup>	0,0269 m <sup>2</sup>	0,0269 m <sup>2</sup>	0,0269 m <sup>2</sup>
<b>Densidad</b>	20 kg/ha	25 kg/ha	30 kg/ha	25 kg/ha	25 kg/ha
<b>Variedad</b>	Master 10	Master 10	Master 10	California	Moapa

En la figura 1 se visualiza la semilla de las distintas variedades de alfalfa.

**Figura 1.**

*Variedades de alfalfa usada en la investigación*



En la figura 2 se aprecia la variedad de alfalfa, master10 sembrada a diferentes densidades.

**Figura 2.**

*Variedad de alfalfa master10 sembrada a diferentes densidades*



En la figura 3 se visualiza las variedades de alfalfa sembrada a una sola densidad

**Figura 3.**

*Variedades de alfalfa sembrada a una sola densidad*



## 2.2. Muestreo

El tipo de muestreo fue aleatorio simple, la toma de muestras se realizó de la mezcla (biosólido más tierra) del macetero y de las plantas (raíces y parte aérea), procedentes de las 3 macetas experimentales de las diferentes densidades consideradas (M1, M2, M3) y de mismo modo de las últimas macetas que están sembradas a la misma densidad con diferentes variedades (M4 y M5), se señaló los puntos tomadas para la muestra de la mezcla (biosólido más tierra) y del mismo punto se recolectó dichas plantas de las (M1, M2, M3, M4 y M5) de la PTAR La Totora en la región de Ayacucho.

## 2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada fue la observación, monitoreo en campo, análisis de contenidos, revisión bibliográfica.

A través de la observación se identificaron la disposición final de los biosólidos de la PTAR La Totora, mientras el monitoreo en campo se realizó desde la siembra de alfalfa en los biosólidos acondicionados con tierra, hasta el tiempo de cosecha. El contenido de los metales pesado se realizó en los biosólidos residuales antes de la siembra de alfalfa y después de ello. Así mismo, se cuantificó en la raíz y parte aérea de la alfalfa.

## 2.4. Descripción de la siembra de alfalfa

Se instalaron tres macetas (M1, M2 y M3) para cultivar una sola variedad de alfalfa (*Medicago sativa*), denominada Master10. Las macetas se distribuyeron en áreas iguales, como se muestra en la Tabla 1, pero con diferentes densidades de siembra. En la maceta M1, las semillas se sembraron a una densidad de 20 kg/ha; en la maceta M2, a una densidad de 25 kg/ha; y en la maceta M3, a una densidad de 30 kg/ha. Según el manual de siembra de alfalfa, la densidad recomendada oscila entre 15 y 25 kg/ha, dependiendo del método utilizado, ya sea mediante sembradoras o manualmente con la técnica de voleo. (Cáritas Puno, 2013).

La técnica de siembra se consideró el boleado mas no el surcado, debido a que en la técnica de boleado se puede distribuir el espacio o distancia de semilla a semilla y también con fines de acumular mayor concentración de metales pesados en sus raíces de alfalfa.

## 2.5. Obtención de muestras

Las muestras seleccionadas para el respectivo muestreo de los biosólidos y de la planta alfalfa tanto de la raíz y parte aérea se han realizado de las macetas experimentales a una profundidad de 0 - 35 cm. Se recolectó 1 kg de muestra del biosólido, 1 kg de biosólido acondicionado con tierra antes de la siembra de alfalfa y después de la cosecha de alfalfa se recolectó 1 kg de muestra del biosólido acondicionado con tierra de cada maceta a densidades de 20, 25 y 30 kg/ha, con una sola variedad de master10 y 1 kg de muestra de las macetas de diferentes variedades e igual densidad de 25 kg/ha, de la primera maceta de variedad moapa y de la segunda maceta llamada california, dicho muestreo se realizó aleatoriamente del mismo lugar donde fueron sembradas la alfalfa. Asimismo, se recolectaron 20 plantas de cada maceta. Con mayor detalle se puede apreciar en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Toma de muestras de biosólidos, biosólidos más tierra y plan*

Tipo de muestras	MUESTRAS								TOTAL
	biosólido	biosólido + tierra	M1 25 MOAPA	M2 25 MASTE R10	M3 25 CALIFO RNIA	M4 20 MASTE R10	M5 30 MASTE R10	BLANCO	
(Biosólido + tierra)									
Análisis de metales pesados antes y después de la fitorremediación	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	8 muestras
Alfalfa (Raíz) Análisis de metales pesados después de la fitorremediación			1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	6 muestras
Alfalfa Parte aérea (hojas y tallos)			1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	6 muestras
								<b>TOTAL</b>	<b>20</b> muestras

**2.5.1. Toma de muestras de los biosólidos y de la mezcla (biosólido más tierra)**

Para poder realizar el respectivo análisis de los metales pesados contenidos en los biosólidos y (biosólidos acondicionado con tierra), se tomaron muestras antes del cultivo y después de la cosecha, pero estas antes fueron secadas al irterperie hasta eliminar toda la humedad presente en los biosólidos, luego se ha tomado 1 kg de muestra y se colocaron en bolsas de polipropileno y en bolsas de papel, estas fueron bien selladas y rotuladas como se puede apreciar en la figura

**Figura 4.**

*Muestras rotuladas para el análisis en el laboratorio*



### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1. Resultados del contenido de metales pesados

Los resultados del contenido por ICP- OES de los metales pesados tanto en biosólidos, biosólidos acondicionado con tierra y en las plantas de alfalfa (*Medicago sativa*), se ha considerado los valores significativos debido a la mayor concentración acumulativa que podrían presentarse como se puede ver en la tabla 3.

##### 3.1.1. Respecto al contenido de los metales pesados en los biosólidos

La investigación inicia con la determinación de la concentración de los metales pesados existentes en los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá”, con fines de poder tener información de los contenidos de éstas y que podrían estar por encima de los límites máximos permisibles y con el propósito de dar una solución con la fitorremediación, usando la planta de alfalfa (*Medicago sativa*), en la tabla 3 podemos ver los resultados de los análisis del contenido de los metales pesados en los biosólidos, se ha considerado a los metales pesados más tóxicos y por ende los que superan los LMP para uso agrícola.

**Tabla 3.**

*Metales pesados de mayor concentración en los biosólidos*

<b>Metales pesados</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
Cromo	320,7
Cadmio	7,3
Plomo	37,7

En la tabla 3, se puede apreciar el alto contenido de cromo, que supera al resto de los metales pesados con un porcentaje de 88 % en los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá”, seguida por el plomo con un 9 % del total y por último el cadmio con 3 %.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 3, podemos decir que los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales se considera no apto para uso agrícola, debido al contenido alto de metales pesados, que sería perjudicial para la salud de los seres vivos, estos llegan a superar los límites máximos permisibles estipuladas en el DECRETO SUPREMO N° 020-2021 donde se aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos, para el periodo 2021-2023.

##### 3.1.2. Metales pesados en los biosólidos acondicionados con tierra

En la tabla 4 se visualiza la presencia de metales pesados en biosólidos acondicionados con tierra, antes de la remoción con la alfalfa.

**Tabla 4.**

*Metales pesados en biosólidos más tierra antes de la fitorremediación*

<b>Metales pesados</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
Cromo	257,7
Cadmio	7,0
Plomo	27,3

En la tabla 4 podemos apreciar que el cromo presenta una elevada concentración de 257,7 mg/kg en los biosólidos más tierra, seguida por el plomo que presenta 27,3 mg/kg y último el cadmio con una concentración de 7 mg/kg, estos valores superan los límites máximos permisibles para uso agrícola estipuladas en el DECRETO SUPREMO N° 020-2021 donde se aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos, para el periodo 2021-2023.

### 3.1.3. Cromo en los biosólidos más tierra después del uso de alfalfa

En la tabla 5 se visualiza la concentración de cromo en las macetas experimentales después del uso de la alfalfa.

**Tabla 5.**

*Cromo en las macetas experimentales después del uso de alfalfa*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
<b>1</b>	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1	199,7
<b>2</b>	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2	172,7
<b>3</b>	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3	177,3
<b>4</b>	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4	145,7
<b>5</b>	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5	160,7

En la tabla 6 se aprecia la presencia de cromo en (%) en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 6.**

*Cromo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>Variedad</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>% de remoción</b>
<b>1</b>	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	58,3	23
<b>2</b>	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	84,7	33
<b>3</b>	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	79,3	31
<b>4</b>	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	112	43
<b>5</b>	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	97,7	38

En la tabla 7 se visualiza la presencia de cromo en los tallos y hojas de alfalfa, después de la fitorremediación.

**Tabla 7.**

*Cromo en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación*

	Variedad de la alfalfa	Concentración (mg/kg)
1	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
2	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
3	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
4	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1
5	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1

- **Factor de bioconcentración del cromo**

El factor de bioconcentración del cromo se calculó usando la siguiente ecuación:

$$BCF = \frac{CB}{CWD}$$

Donde:

BCF: Es el grado en donde ocurre la bioconcentración.

CB: Concentración del metal en la planta (mg/kg).

CWD: Concentración del metal en el suelo (mg/kg).

La concentración de cromo antes de la fitorremediación: 257,7 mg/kg.

En la tabla 8 se puede apreciar el factor de bioconcentración del cromo calculada con la ecuación anterior.

**Tabla 8**

*Factor de bioconcentración del cromo*

Variedad de la alfalfa	Concentración (mg/kg)	Factor de bioconcentración
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	58,3	0,23
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	84,7	0,33
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	79,3	0,31
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	112	0,43
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	97,7	0,38

En la tabla 8 podemos apreciar el resultado de la bioconcentración después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*Medicago sativa*), donde (Castro, et al., 2022) nos indica que BCF tiene que ser menor a 1, en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*Medicago sativa*) es una planta acumuladora debido a que el factor de bioconcentración está por debajo de 1.

• **Factor de traslocación del cromo**

El factor de traslocación del cromo se calculó usando la siguiente ecuación:

$$TF = \frac{CB}{CK}$$

Donde:

TF: Es el factor de traslocación.

CB: Concentración del metal en la parte aérea de la planta (mg/kg).

CK: Concentración del metal en la raíz (mg/kg).

En la tabla 9 se muestra los resultados del factor de traslocación del cromo

**Tabla 9**

*Factor de traslocación del cromo*

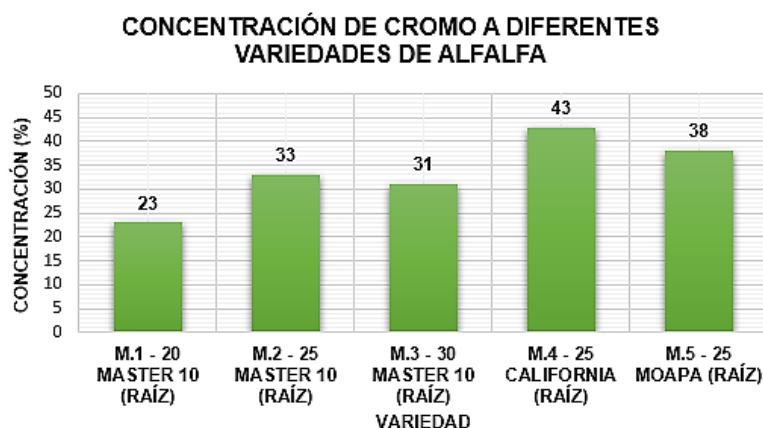
Variedad de la alfalfa	Concentración (mg/kg) en la parte aérea	Factor de traslocación
M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,017
M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,012
M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,013
M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,009
M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,010

En la tabla 9 podemos apreciar el resultado del factor de traslocación después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*Medicago sativa*), la concentración para cada variedad se consideró 1 mg/kg por no tener un dato exacto de dicha concentración, donde (Castro, et al., 2022) nos indica que TF sus valores tiene que estar <1 o entre 1 - 0,1, en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*Medicago sativa*) es una planta exclusora ósea no transporta el cromo de la raíz a la parte aérea de la planta.

En la figura 5 se muestra la presencia de cromo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Figura 5.**

*Presencia de Cromo en las macetas después de la fitorremediación*



Los resultados obtenidos en las macetas después de la fitorremediación se pueden apreciar en la figura 5, donde vemos que en la maceta 4 - 25 california - M4 existe mayor remoción del cromo con un 43 % de remoción en comparación del resto de las macetas, mientras el menor remoción lo presenta la variedad de master10 de densidad 20 kg/ha con un porcentaje de remoción de 23 %, entonces se llega a la conclusión que la mejor variedad que absorbió es la california y de mismo modo solo absorbe en las raíces mas no es absorbido a las partes áreas de alfalfa como se puede apreciar con mayor detalle en la tabla 14, también la densidad de siembra de alfalfa que mayor resultados indica es la de 25 kg/ha.

En el trabajo de investigación realizada por Calderón & Zamudio, (2019), reportan los porcentajes de remoción de acuerdo al tratamiento de concentración de cromo en suelos contaminados aledaños al rio Bogotá, estos tratamientos de cromo fueron realizadas con la planta de *Acasia melanoxylon*. Las concentraciones preparadas con cromo para la fitorremediación fueron de 10 mg/kg, 50 mg/kg y 100 mg/kg, los autores reportan los porcentajes de remoción de 27 %, 39 % y 14 % sucesivamente, dando como mayor porcentaje de remoción de 39 % en sus raíces y menos de 1 % en tallos y hojas, como resultado indican que la planta *Acasia melanoxylon* es bioacumulador en sus raíces y no asimila a las partes aéreas de la planta en el tratamiento de suelos contaminados a concentración de 50 mg/kg, mientras a mayor concentración de cromo en el suelo solo presenta un 14 % de remoción, lo cual indica los autores que a mayor concentración dicha planta no completa su desarrollo en suelos con altas concentraciones debido a la fitotoxicidad de la planta. Mientras en el presente trabajo presenta una remoción de 43 % de cromo en las raíces de la alfalfa de variedad california a densidad de cultivo de 25 kg/ha con un tiempo de corte de 6 meses, de igual modo la concentración en los tallos y hojas de alfalfa son menores a 1 mg/kg de cromo como se puede apreciar en la tabla 7, entonces cabe resaltar que la alfalfa (*Medicago sativa*) es fitoestabilizador de cromo en sus raíces. La concentración de cromo de 145,7 mg/kg en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación está por encima de los límites máximos permisibles para uso agrícola estipuladas en el DECRETO SUPREMO N° 020-2021, debido a la alta concentración acumulada en los biosólidos no se pudo extraer en su mayoría el contenido de este metal muy tóxico para la salud y es necesario aplicar dicha planta de alfalfa en el mismo biosólido más tierra hasta bajar la concentración por debajo de los límites máximos permisibles.

### 3.1.4. Cadmio en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación

En la tabla 10 se visualiza la concentración de cadmio en las macetas experimentales después de la fitorremediación.

**Tabla 10.**

*Cadmio en las macetas experimentales después de la fitorremediación*

Macetas	Concentración (mg/kg)
1 MACETA 1 – 20 MASTER 10 - M1	3,7
2 MACETA 2 – 25 MASTER 10 - M2	2,7
3 MACETA 3 – 30 MASTER 10 - M3	4,0
4 MACETA 4 – 25 CALIFORNIA - M4	1,2
5 MACETA 5 – 25 MOAPA - M5	3,0

En la tabla 11 se aprecia la presencia de cadmio (%) en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 11.**  
*Cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*

	Variedades	Concentración (mg/kg)	% de remoción
1	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	3,3	47
2	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	3,7	53
3	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	2,3	33
4	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	5,3	76
5	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	4,0	57

En la tabla 12 se muestra la presencia de cadmio en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 12.**  
*Cadmio en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación*

	Macetas	Concentración (mg/kg)
1	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
2	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
3	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
4	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1
5	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1

- **Factor de bioconcentración del cadmio**

En la tabla 13 se visualiza los resultados del factor de bioconcentración del cadmio.

**Tabla 13.**  
*Factor de bioconcentración del cadmio*

Variedades de alfalfa	Concentración (mg/kg)	Factor de bioconcentración
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	3,3	0,47
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	3,7	0,30
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	2,3	0,33
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	5,3	0,75
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	4,0	0,57

- **Factor de traslocación del cadmio**

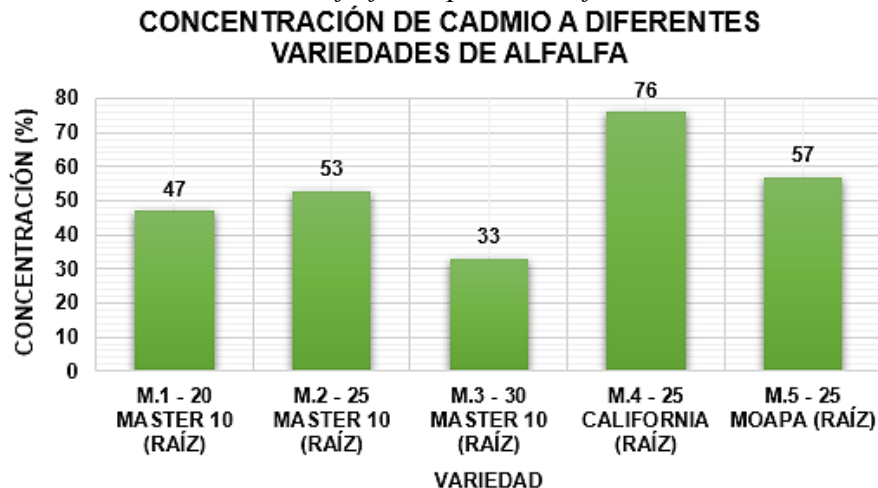
En la tabla 14 se aprecia los resultados de factor de traslocación del cadmio.

**Tabla 14.**  
*Factor de traslocación del cadmio*

Variedad de la alfalfa	Concentración (mg/kg) en la parte aérea	Factor de traslocación
M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,30
M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,27
M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,43
M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,19
M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,25

En la figura 6 se muestra la presencia de cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Figura 6.**  
*Cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*



En la figura 6 se aprecia que la maceta 4 - 25 california - M4 existe menor cantidad de cadmio lo que indica mayor remoción con porcentaje de 76 % en comparación del resto de las macetas, donde el menor porcentaje de remoción de 33 % lo presenta la variedad master10 de densidad 30 kg/ha, entonces se llega a la conclusión que la mejor variedad que absorbió es la california y de mismo modo solo absorbe en las raíces mas no en las partes aéreas de alfalfa como se puede ver la tabla 14, también la densidad que mayor resultados indica es la de 25 kg/ha.

Giraldez (2019), reporta que la remoción del cadmio en los suelos degradados por fertilización sintética en la E.E.A El Mantaro logró extraer el cadmio con un porcentaje de remoción de 34 % en su parcela 3 con cultivo de alfalfa de variedad Aragón con densidad de cultivo de 35 kg/ha y con un tiempo de corte de 5 meses, de igual modo indica que la bioasimilación desde las raíces a los tallos y hojas de alfalfa fue menor a 1 mg/kg, tal cual nos indica que no traslada el cadmio a los tallos y hojas de la planta.

En el presente investigación se logró remover un 76 % de cadmio superando a Giraldez (2019), la causa es la variedad que mayor efecto genera por el lugar de cultivo es la california, ya que se sabe que la alfalfa en la región de Ayacucho es casi oriunda y también el otro motivo es que se trata de biosólidos ricos en nutrientes y esto ayuda a mejorar su crecimiento y desarrollo de la planta para su mejor rendimiento con respecto a la extracción del cadmio,

también otro factor es el tiempo de corte o cosecha de la alfalfa que se esperó los 6 meses para su cosecha.

### 3.1.5. Plomo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación

En la tabla 15 se visualiza la concentración de plomo en las macetas experimentales después de la fitorremediación.

**Tabla 15.**

*Plomo en las macetas experimentales después de la fitorremediación*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
1	MACETA 1 – 20 MASTER 10 - M1	8,3
2	MACETA 2 – 25 MASTER 10 - M2	9,0
3	MACETA 3 – 30 MASTER 10 - M3	11,3
4	MACETA 4 – 25 CALIFORNIA - M4	6,0
5	MACETA 5 – 25 MOAPA - M5	7,3

En la tabla 16 se muestra la presencia de plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 16.**

*Plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>VARIEDAD</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>% de remoción</b>
1	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	16,3	59
2	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	15,3	56
3	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	12,3	45
4	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	19,3	71
5	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	16,0	59

En la tabla 17 se aprecia la presencia de plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 17.**

*Plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
1	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,7
2	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,0
3	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	3,3
4	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<2
5	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	3,0

- **Factor de bioconcentración del plomo**

En la tabla 18 se visualiza los resultados del factor de bioconcentración del plomo.

**Tabla 18.**

*Factor de bioconcentración del plomo*

Variedades de alfalfa	Concentración (mg/kg)	Factor de bioconcentración
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	16,3	0,59
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	15,3	0,56
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	12,3	0,45
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	19,3	0,71
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	16,0	0,59

- **Factor de traslocación del plomo**

**Tabla 19.**

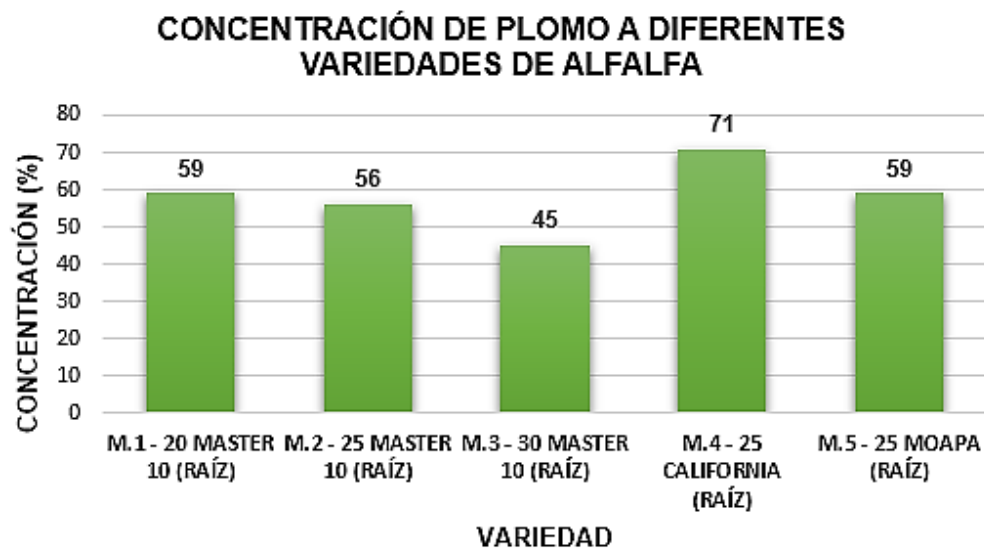
*Factor de traslocación del plomo*

Variedad de alfalfa	Concentración (mg/kg)	Factor de traslocación
M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,7	0,16
M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,0	0,13
M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	3,3	0,27
M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<2	0,10
M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	3,0	0,18

En la figura 7 se observa una mejor visualización de la presencia de plomo en las raíces de alfalfa una vez aplicada la fitorremediación.

**Figura 7.**

*Plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*



La figura 7 muestra que la maceta 4 - 25 california - M4 existe mayor remoción de plomo con un porcentaje de remoción de 71 % en comparación del resto de las variedades, en especial la variedad de alfalfa master10 sembrada a densidad 30 kg/ha que presenta una remoción muy baja de 45 % de plomo, entonces se llega a la conclusión que la mejor variedad que absorbió es la california. Cabe resaltar que la raíz de alfalfa de las tres variedades usadas no son exclusoras de plomo, ósea que no retienen por completo en las raíces, es más, también existe concentraciones en consideración en los tallos y hojas de alfalfa, entonces no es recomendable el uso de la planta de alfalfa para la remoción del plomo en específico. Ya que como consecuencia no se debería consumir dicho vegetal por los animales por más mínimo que hubiera el contenido del plomo en las partes áreas del vegetal.

Munive (2018), reportó en su trabajo de tesis un porcentaje de remoción y acumulación del plomo en su raíz de 80 % y 20 % en los tallos, hojas y frutos, usando compost de Stevia y a la vez aplicando la fitorremediación con la planta de maíz y sin uso de densidad de siembra, también trabajó con la planta de girasol donde obtuvo una remoción de 55 % acumuladas y fitoestabilizadas en sus raíces, mientras la asimilación del plomo a los tallos, hojas y flores fue de 45 % aunque el girasol no es consumida por el ser humano, esta debe bioacumular por lo menos gran cantidad del metal pesado en las raíces.

Mientras en este estudio se logró remover 71 % de plomo, esto debido a la variedad de la alfalfa, a la densidad de siembra y por el tiempo de corte de 6 meses, cabe señalar que en este trabajo de tesis existe concentración pequeña en los tallos y hojas superando 1 mg/kg, en tal sentido no es recomendable aplicar la fitorremediación para remover el plomo con la ayuda de la alfalfa, tampoco usar el maíz como lo señala Munive (2018), por ser una planta comestible por el ser humano. La concentración de los biosólidos acondicionados con tierra están por debajo de los límites máximos permisibles para uso agrícola y suelo residencia o parques.

#### 4. CONCLUSIONES

Se determinó luego del proceso de remoción con la planta alfalfa, las concentraciones de los metales pesados presentes en los biosólidos acondicionado con tierra; siendo para el cromo de 257,7 mg/kg, cadmio de 7,0 mg/kg y plomo de 27,3 mg/kg, mientras en la raíz y parte aérea de la alfalfa se encontró que la mayor acumulación en las raíces se obtuvo con la variedad california y con densidad de 25 kg/ha, cromo presente con una concentración de (112 mg/kg), cadmio (4,0 mg/kg) y plomo (18,7 mg/kg). Mientras en la parte aérea la acumulación de los metales pesados es demasiado bajo, el cromo presenta una concentración <1 mg/kg, mientras el cadmio presenta un valor <1 mg/kg ambos en toda las variedades y densidades, también el plomo presenta un valor muy bajo de <2 mg/kg en la variedad california y de densidad 25.

Se determinó el porcentaje de remoción de los metales pesados luego del empleo de la raíz de alfalfa (*Medicago sativa*) en la muestra preparada (biosólidos acondicionado con tierra), usando tres variedades distintas de alfalfa y sembradas a diferentes densidades, donde se obtuvo buenos resultados de la remoción de metales pesados con la variedad de california y con densidad de siembra de 25 kg/ha, pudiendo encontrarse al cromo con (43 %), cadmio con (76 %). Por último, el plomo con (71 %).

Se concluye que la alfalfa (*Medicago sativa*) es una especie fitoestabilizadora de cromo, cadmio y plomo en sus raíces, es una planta exclusora ósea no traslada significativamente al cromo, cadmio y plomo de la raíz a los tallos y hojas, por lo cual está determinado que la *Medicago sativa* es utilizable como planta fitorremediadora para biosólidos o suelos contaminados con metales pesados. Las concentraciones están por debajo de los Límites

máximos permisibles después de la fitorremediación tanto del cadmio y plomo mientras el cromo por presentar alta concentración superior a los 100 mg/kg no se encuentra por debajo de los LMP para uso agrícola a pesar de presentar un grado de remoción de 43 %.

## 5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la Escuela Profesional de Ingeniería Química y a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “la Totorá”.

Asimismo, a la revista Aypate, y de manera muy especial a su Editor en Jefe y a su Comité Editorial, por la oportunidad brindada de difundir nuestros trabajos.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abril, L. (2016). *Análisis comparativo de la velocidad de degradación de cromo VI aplicando fitorremediación en medios físicos diferentes: suelo y agua*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Bayón, S. (2015). *Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales pesados*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Calderón, D., & Zamudio, A. (2019). *Fitoestabilización de Cromo Hexavalente por Acasia melanoxylon; una estrategia para el tratamiento de suelos contaminados*. Cundinamarca, Bogotá, Colombia: Universidad Jorge Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería.
- Cáritas Puno. (06/08/2013). *Manual para el Cultivo de Alfalfa*. Obtenido de ISSUU: [https://issuu.com/caritas\\_puno/docs/manual\\_alfalfa\\_2009\\_alvaro](https://issuu.com/caritas_puno/docs/manual_alfalfa_2009_alvaro)
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, J. (2015). Tratamiento para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. *Revista Ingeniería y Región*, 74,75.
- Chavez, L. (2014). *Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo*. Lima, Perú.: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Córdova, A. (2019). *Efluentes de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales Totorá y la contaminación de las Hortalizas por metales pesados en la comunidad de Totorá - Ayacucho 2017 - 2018*. Lima, Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Giraldez, L. (2019). *Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (Medicago sativa) en la remediación de suelos degradados por fertilización sintética en la E.E.A El Mantaro*. Huancayo, Perú.: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- González, G. D. (2011). *Fitorremediación: Una herramienta Viable para la Descontaminación de Aguas y Suelos*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes.
- Hernández, C., Gutiérrez, A., Juan, G., González, D., Rubio, C., Revert, C., . . . Hardisson, A. (2017). Contenido de metales pesados en Isodos de depuradora: estrategia de gestión para una isla oceánica. *SESA Revista de Salud Ambiental*, 5-6.

- Lavado, C., Rosario, M., & Recuay, N. (2013). Remoción de cromo (VI) empleando carbonos preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *SciELO*, 2.
- Martell, M. N. (2014). *Acumulación de Metales Pesados en Beta vulgaris L. y Lolium perenne L. de Suelos de Cuemanco*. México D.F., : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mayta, R., & Mayta, J. (febrero de 2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *SciELO*. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/general/remocion.php>
- Mendoza, M. (2020). *Capacidad fitorremediadora de la alfalfa Medicago sativa L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huaura*. Huaura: Universidad Católica Sedes Sapientiae.
- Mendoza, M. (2020). *Capacidad fitorremediadora de la alfalfa Medicago sativa L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huaura*. Huaura, Perú: Universidad Católica sedes sapientiae.
- Munive, R. (2018). *Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante Compost de Stevia y Fitorremediación*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Paredes, J. L. (2015). *Optimización de la Fitorremediación de Mercurio en Humedales de flujo continuo empleando Eichhornia Crassipes "Jacinto de Agua"*. Tingo Maria: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Peña, J., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *SciELO*, 2-3.
- Picazo, N., Soria, M., Carrillo, F., Martínez, A., González, G., & Guajardo, M. (2014). Remoción de Cromo usando como adsorbente residuos industriales. *CienciAcierta, Revista científica, tecnológica y humanística*, 26,27.
- Prieto, J., González, C., Román, A., & F., P. (2014). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 29,44.
- Quishpe, K. (2016). *Determinación microbiológica y de metales pesados en jugos de alfalfa (Medicago sativa) usado en la preparación de jugos naturales de fruta, expendidos en los diferentes Mercados del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Rodrigo, T. D. (2018). *Capacidad fitorremediadora de la especie Helianthus annuus mediante la incorporación de enmiendas a suelos contaminados por metales pesados (Plomo, Cromo) de Industrias Metalmeccánicas*. Lima, Perú.: Universidad Peruana Unión.

- Salazar, M. (2014). *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Evaluación de especies nativas en la Provincia de Córdoba*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Utría, E., Reynaldo, I., Morales, D., Morúa, A., & Álvarez, N. (2006). *Caracterización de los bisólidos de Aguas Residuales de la estación Depuradoras de Aguas Residuales "QUIBU"*. La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.