

Potential of *Lupinus mutabilis* Sweet (tarwi) to mitigate cadmium contamination in agricultural soils of the Puente Piedra district, Lima 2023

Haniel Josue Torres Joaquin, MSc.¹, Joel David Coarite Ticse, Eng.², and Isaac Jefferson Aguilar Jara, Eng.¹

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, Haniel.torres@upn.pe, n00181840@upn.pe, n00171117@upn.pe

Summary- This study evaluated the potential of *Lupinus mutabilis* Sweet (Tarwi) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils in the Puente Piedra district, Lima. A quantitative approach was adopted with an experimental design that included four treatments: T0 (0 mg CdSO₄/L), T1 (25 mg CdSO₄/L), T2 (45 mg CdSO₄/L), and T3 (65 mg CdSO₄/L). After 18 days of exposure, the final cadmium concentrations in the soil were measured, yielding the following values: T1 (19.71 mg/kg), T2 (39.18 mg/kg), and T3 (58.67 mg/kg). The results indicated that higher cadmium concentrations in the soil corresponded to lower removal percentages by *Lupinus mutabilis*. Additionally, significant changes were observed in the morphology of the stem, root, and leaf during the treatment period. Statistical analysis using the Student's T-test showed that the physical changes in leaves were significant for the T0-T1 and T0-T3 pairs, while changes in the stem and root were significant for all treatments (T0-T1, T0-T2, and T0-T3). In conclusion, the study demonstrated that *Lupinus mutabilis* can mitigate cadmium contamination in agricultural soils, although the effectiveness decreases as cadmium concentration increases.

Palabra Clave-- *Lupinus mutabilis* Sweet (Tarwi), fitorremediación, cadmio.

Potencial de la *Lupinus mutabilis* Sweet (*tarwi*) para mitigar la contaminación de cadmio en suelos agrícolas del distrito de Puente Piedra, Lima 2023

Haniel Josue Torres Joaquin, MSc.¹, Joel David Coarite Ticse, Eng.², and Isaac Jefferson Aguilar Jara, Eng.¹

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, Haniel.torres@upn.pe, n00181840@upn.pe, n00171117@upn.pe

Summary- This study evaluated the potential of *Lupinus mutabilis* Sweet (*Tarwi*) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils in the Puente Piedra district, Lima. A quantitative approach was adopted with an experimental design that included four treatments: T0 (0 mg CdSO₄/L), T1 (25 mg CdSO₄/L), T2 (45 mg CdSO₄/L), and T3 (65 mg CdSO₄/L). After 18 days of exposure, the final cadmium concentrations in the soil were measured, yielding the following values: T1 (19.71 mg/kg), T2 (39.18 mg/kg), and T3 (58.67 mg/kg). The results indicated that higher cadmium concentrations in the soil corresponded to lower removal percentages by *Lupinus mutabilis*. Additionally, significant changes were observed in the morphology of the stem, root, and leaf during the treatment period. Statistical analysis using the Student's T-test showed that the physical changes in leaves were significant for the T0-T1 and T0-T3 pairs, while changes in the stem and root were significant for all treatments (T0-T1, T0-T2, and T0-T3). In conclusion, the study demonstrated that *Lupinus mutabilis* can mitigate cadmium contamination in agricultural soils, although the effectiveness decreases as cadmium concentration increases.

Palabra Clave-- *Lupinus mutabilis* Sweet (*Tarwi*), fitorremediación, cadmio.

I. INTRODUCCIÓN

A. Realidad problemática

La contaminación de suelos es una problemática global que ha aumentado significativamente a lo largo de los años. Sus raíces se remontan a la Revolución Industrial, un periodo comprendido entre 1760 y 1840, que marcó un notable crecimiento económico para muchos países. Sin embargo, con el tiempo, se observaron efectos adversos en los ecosistemas, incluida la degradación de la calidad del suelo, debido al uso intensivo de recursos naturales, tanto renovables como no renovables [15].

En Perú, la contaminación del suelo ha llevado a la degradación de 1 125 711 hectáreas en las regiones de costa y sierra, además de 17 203 165 hectáreas en la selva, sumando un total de 18 328 876 hectáreas de suelos degradados en todo el país. Ante la crisis alimentaria que enfrenta la nación, se ha estimado que la superficie agrícola actual asciende a 11 649 715 hectáreas [8]. Es relevante destacar que el suelo es un medio altamente susceptible a la persistencia de contaminantes, entre los cuales el cadmio (Cd) es

particularmente preocupante. Este metal pesado afecta negativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y su presencia está estrechamente relacionada con actividades antropogénicas, específicamente el uso de fertilizantes fosforados y agroquímicos. Estos productos, que incluyen cadmio en su composición, han contribuido al incremento de las concentraciones de este metal, superando los límites establecidos en los estándares de calidad del suelo para uso agrícola en Perú [3].

Las actividades antropogénicas han provocado un aumento en la concentración de contaminantes en suelos agrícolas. En el departamento de Lima, se estima que 262 931 hectáreas de suelo agrícola requieren remediación [7]. El costo de la remediación puede superar los ingresos generados por la explotación de recursos, como en el caso de la minería. Ante esta situación, se han explorado soluciones más ecológicas y sostenibles, como la fitorremediación, una tecnología medioambiental de bajo costo que emplea plantas para la remediación in situ de suelos contaminados por metales pesados. Las principales fito-tecnologías incluyen la fitoestabilización, la fitoextracción y la fitovolatilización [9].

En el distrito de Puente Piedra, se han documentado antecedentes de contaminación de suelos agrícolas, principalmente debido al uso excesivo de fertilizantes fosforados y plaguicidas. Adicionalmente, en las proximidades existen talleres de fundición clandestinos y almacenes de envases de sustancias peligrosas, los cuales carecen de sistemas adecuados de gestión de residuos. Esta situación ha generado un incremento en la concentración de metales pesados en el suelo, destacando el cadmio, que representa un peligro significativo para los productos agrícolas cultivados en la zona. La preocupación por los alimentos contaminados con cadmio es considerable, dado que su distribución y comercialización en mercados locales (como Huamantanga y Mercado 3 Regiones) podrían causar graves daños a la salud de los residentes de Puente Piedra.

B. Marco Teórico

***Lupinus mutabilis* Sweet**, comúnmente conocido como *tarwi*, ha sido una fuente de alimento en los países andinos desde tiempos prehistóricos. En regiones como Perú, Ecuador y Bolivia, las poblaciones nativas han dependido de esta planta para su sustento y soporte desde épocas remotas [17]. Esta leguminosa posee una raíz robusta que puede extenderse hasta 50 cm de profundidad y mantiene una simbiosis con la

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).

DO NOT REMOVE

bacteria nitrificante *Rhizobium lupino*, formando nódulos de diversos tamaños [1].

Las hojas de *Lupinus mutabilis* están dispuestas de manera digitada, conformadas por 8 folíolos ovalados. Estas hojas presentan pocas vellosidades y pueden cambiar de color dependiendo del contenido de antocianina. La altura de la planta está determinada por el tallo primario, que puede variar entre 0.5 y 2.0 metros [14]. El número de ramas varía significativamente, llegando hasta 52 en algunos casos, y el rendimiento de la planta se correlaciona con la cantidad de ramas y vainas fructificadas, con variaciones en la ramificación que pueden incluir un tallo principal central con ramas en forma de candelabro o ramas desde la base con inflorescencias a la misma altura [17].

Las flores de *Lupinus mutabilis* miden aproximadamente 1.2 cm de largo y presentan una forma típica de las papilionáceas. La quilla de la flor protege al pistilo y a 10 estambres. El fruto es verde o verde oscuro dependiendo de su madurez [14]. La vaina es elíptica, con una longitud de 6 a 12 cm y un ancho de 1.5 a 2.3 cm. Las semillas del tarwi permanecen incluidas en la vaina, presentando una forma ovalada o casi cuadrangular, con un tamaño que varía entre 0.5 y 1.5 cm [1].

El ciclo fenológico del tarwi se divide en seis etapas: emergencia, primera hoja verdadera, desarrollo del rizo floral, floración, fructificación y finalmente maduración, cada una de las cuales se evidencia por cambios morfológicos específicos.

Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso mediante el cual diversas plantas pueden descomponer, eliminar, retener o movilizar contaminantes presentes en el suelo y el agua. Este proceso se puede clasificar en varias categorías según el mecanismo utilizado:

- **Fitoextracción:** Consiste en la absorción y translocación de contaminantes desde las raíces hacia el resto de la planta. Comparado con métodos convencionales como la minería, la fitoextracción genera menos residuos [13].
- **Rizofiltración:** En este proceso, los contaminantes disueltos en la solución radicular son adsorbidos, precipitados o absorbidos por las raíces de las plantas. Dependiendo de la naturaleza del contaminante, este puede ser acumulado o inmovilizado en la rizosfera [13].
- **Fitoestabilización:** Se refiere al uso de plantas y sus raíces para evitar la migración de contaminantes a través de procesos como la erosión o lixiviación. Los contaminantes pueden ser inmovilizados en el suelo mediante absorción, adsorción o precipitación en la zona radicular [13].
- **Rizodegradación:** Este proceso involucra la descomposición de contaminantes en el suelo por acción de microorganismos presentes en la rizosfera,

facilitada por los compuestos exudados por las raíces de las plantas [2, 13].

- **Fitodegradación:** También conocida como fitotransformación, este proceso implica la absorción de contaminantes por las plantas, seguido por su degradación mediante procesos metabólicos internos o la acción de enzimas vegetales [13].
- **Fitovolatilización:** Es el proceso mediante el cual las plantas absorben un contaminante, lo metabolizan y lo liberan en una forma volátil a través de la transpiración [13].

Contaminación del Suelo

La contaminación del suelo es un problema de creciente preocupación a nivel global. Se clasifica como el tercer mayor problema en la funcionalidad del suelo en Europa y Eurasia, y afecta también otras regiones como África del Norte, Asia y América Latina, debido principalmente a la actividad antropogénica que ha incrementado las concentraciones de metales pesados en el suelo.

Entre los metales pesados que más alteran los suelos se encuentran el mercurio, cadmio, plomo, arsénico, níquel, cobre, zinc, cromo, molibdeno, manganeso, selenio, flúor y boro, todos ellos potencialmente tóxicos en concentraciones elevadas [13].

El cadmio (Cd) es un metal que se encuentra comúnmente en suelos, enriquecido por actividades humanas como la minería, la aplicación de fertilizantes fosfatados y la deposición atmosférica. La producción de baterías recargables representa más del 80% del uso actual de cadmio [6].

La adición de fertilizantes fosfatados ha llevado a investigaciones para reducir los niveles de cadmio en estos productos. Un modelo de balance de masas estimó que las concentraciones permisibles de cadmio en fertilizantes deben equilibrarse con las pérdidas anuales para evitar un incremento en la concentración de cadmio en el suelo a largo plazo [13].

En Perú, el artículo 31 de la Ley N° 28611 y el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM establecen los estándares de calidad ambiental para suelos, incluyendo límites específicos para cadmio y otros metales [10].

Aunque el cadmio es menos soluble que otros cationes como el Ca^{2+} debido a su tendencia a formar enlaces covalentes con superficies adsorbidas, su movilidad en el suelo es limitada, lo que reduce su lixiviación pero incrementa su persistencia en el entorno [12].

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicativo, basada en descubrimientos tecnológicos provenientes de investigaciones teóricas básicas que son aplicadas directamente para resolver problemas específicos. Este enfoque genera soluciones innovadoras ante las necesidades sociales e industriales de nuestra sociedad. La investigación sigue un enfoque

cuantitativo de tipo experimental, caracterizado por la manipulación de una o más variables independientes por parte del investigador, con el objetivo de observar sus causas y efectos en una o más variables dependientes [12].

B. Población y muestra

La población se define como la totalidad de la situación estudiada, incluyendo todas las unidades de análisis que la componen. En este caso, la población está representada por un área de 986 m² de terreno agrícola ubicado en la asociación La Unión, en el distrito de Puente Piedra, provincia y departamento de Lima. La muestra es una parte representativa de la población en la que se realiza el estudio. Para esta investigación, se utilizó una guía de muestreo de suelos, aplicando el muestreo de comprobación de la remediación para áreas menores a 1000 m² con forma rectangular. Finalmente, se trabajó con un total de 24 kg de suelo agrícola, distribuido en macetas de 2 kg cada una.

C. Técnicas he instrumentos de recolección de datos.

La técnica empleada en esta investigación consiste en observar si la hipótesis planteada sobre el alto potencial de la especie *Lupinus mutabilis* (Tarwi) en la remoción de cadmio en suelos agrícolas es correcta. El análisis se basa en examinar los datos obtenidos a partir de experimentos de campo, con el objetivo de responder a los objetivos del estudio. Se empleó la técnica de observación de campo experimental, que permitió recolectar información crucial sobre las características y el crecimiento de las variables estudiadas frente a la problemática presentada en esta investigación.

D. Procedimiento

Se recolectaron 24 kg de suelo agrícola de la zona de Puente Piedra y se dividieron en 12 macetas de 2 kg cada una. En el laboratorio de la Universidad Privada del Norte, se administraron 0, 25, 45 y 65 mg de CdSO₄/l utilizando análisis finos y cajas de Petri. Cada tratamiento fue repetido 3 veces y disuelto en 200 ml de agua potable, generando concentraciones de 0 mg (T1), 25 mg (T2), 45 mg (T3) y 65 mg CdSO₄/l (T4) por kg de tratamiento. Se adquirieron 50 semillas de *Lupinus mutabilis* (Tarwi) del departamento de Ancash. Para la germinación, se usaron 36 semillas que fueron lavadas varias veces con agua potable y luego sumergidas en ácido giberélico (50 mg/kg) por 5 minutos antes de ser incubadas en las macetas. Durante el estudio, se midieron las raíces, tallos y hojas en los 4 tratamientos, utilizando la técnica de observación y registrando los datos en fichas de recolección de datos para comparar los resultados obtenidos en diferentes concentraciones de cadmio.

E. Análisis de datos

Los datos recolectados fueron analizados mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Luego, utilizando el software SPSS Statistics 27, se emplearon estadísticas descriptivas para determinar la media, la moda y la desviación estándar de cada variable medida.

III. RESULTADOS

A. Características físicas la *Lupinus mutabilis sweet* (tarwi) al finalizar el proceso de adsorción.

Tabla I
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS LA LUPINUS MUTABILIS SWEET (TARWI)

DÍAS	TRATAMIENTO	HOJA (cm)	TALLO (cm)	RAIZ (cm)
6 DIAS	T0	0.9	7.9	5.4
	T1	0.6	6.2	2.57
	T2	0.77	5.73	1.7
	T3	0.5	4.73	0.87
12 DIAS	T0	1.4	15.43	10.87
	T1	1.33	9.7	3.5
	T2	1.37	8.77	2.43
	T3	1.33	7.67	1.57
18 DIAS	T0	2.37	21.47	13.63
	T1	2.07	14.23	5
	T2	2.73	13.60	3.87
	T3	1.93	11.9	2.5

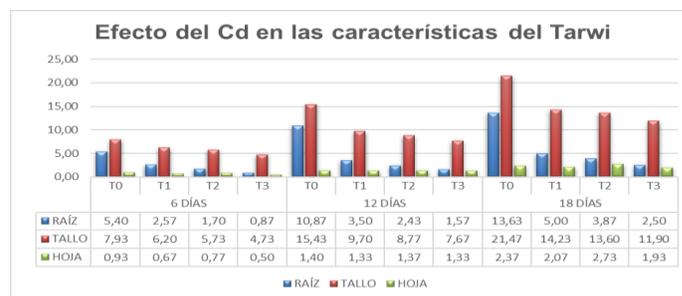


Fig. 1 Efecto del cadmio en las características Físicas de la *Lupinus Mutabilis Sweet* (tarwi) en raíz, tallo y hojas.

B. Concentración de Cadmio en suelo tras la remoción por la *Lupinus mutabilis sweet* (tarwi).

Tabla II
Concentración de Cd inicial y CONCENTRACIÓN DE CD FINAL.

MUESTRA	Cd Inicial mg/kg	Cd Final mg/kg
T0	0,517	0,03
T1	25,43	19,71
T3	45,32	39,18
T4	65,41	58,67

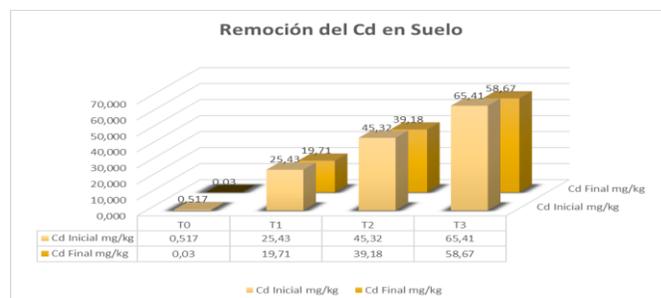


Fig. 2 Efecto del cadmio en las características Físicas de la *Lupinus Mutabilis Sweet* (tarwi) en raíz, tallo y hojas

C. el porcentaje de remoción de cadmio en el suelo producido por la *Lupinus Mutabilis Sweet (tarwi)*.

TABLA III
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CADMIO (Cd) EN EL SUELO.

TRATAMIENTO	% DE REMOCIÓN
T0	94
T1	22
T2	14
T3	10

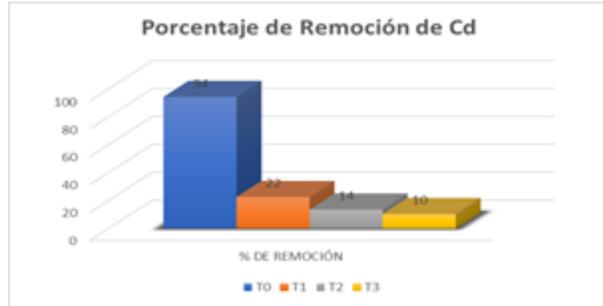


Fig. 3 Porcentaje de Remoción de cadmio (Cd) en el suelo.

D. Análisis estadístico inferencial de las características físicas de la *Lupinus Mutabilis Sweet (tarwi)*.

TABLA IV
PRUEBA DE T STUDENT EN HOJA DE LUPINUS MUTABILIS SWEET (TARWI).

Par	T0 - T1	Diferencias emparejadas			gl	Sig. (bilateral)
		Desviación estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia			
			Inferior	Superior		
Par 1	T0 - T1	,019053	,163671	,258329	2	,003
Par 2	T0 - T2	,168150	-,473374	,362040	2	,624
Par 3	T0 - T3	,050954	,184756	,437911	2	,009

Note: En la tabla IV, se evidencia que la sig. (bilateral) de las muestras emparejadas (Par 1 T0-T1) cuyo valor sig. es 0.03 y (Par 3 T0-T3) cuyo valor sig. es 0.09, tienes valores menores a 0.05, por tanto, podemos concluir que en cuanto a las características físicas de las hojas en las muestras emparejadas si se producen cambios significativos al finalizar el proceso de absorción de cadmio en los suelos contaminados. Por otro lado, en el (Par 2 T0-T2) cuyo valor es 0.624, tiene un valor mayor de 0.05 por lo que podemos concluir que en esa muestra emparejada no se produjeron cambios significativos al completar el proceso de absorción de cadmio en el suelo contaminado.

TABLA V
PRUEBA DE T STUDENT EN TALLOS DE LUPINUS MUTABILIS SWEET (TARWI).

Par	T0 - T1	Diferencias emparejadas			gl	Sig. (bilateral)
		Desviación estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia			
			Inferior	Superior		
Par 1	T0 - T1	,491246	3,680011	6,120655	2	,003
Par 2	T0 - T2	,374517	4,647648	6,508352	2	,001
Par 3	T0 - T3	,283660	6,140349	7,549651	2	,001

Note: En la tabla V, se evidencia que la sig. (bilateral) de las muestras emparejadas (Par 1 T0-T1) cuyo valor sig. es 0.03, (Par 2 T0-T2) cuyo valor sig. es 0.01 y (Par 3 T0-T3) cuyo valor sig. es 0.01, tienes valores menores a 0.05, por tanto, podemos concluir que en cuanto a las características físicas del tallo en esas muestras emparejadas si producen cambios significativos al completar el proceso de absorción de cadmio en el suelo contaminado.

TABLA VI
PRUEBA DE T STUDENT EN RAÍCES DE LUPINUS MUTABILIS SWEET (TARWI).

Par	T0 - T1	Diferencias emparejadas			gl	Sig. (bilateral)
		Desviación estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia			
			Inferior	Superior		
Par 1	T0 - T1	,461816	5,130451	7,424882	2	,002
Par 2	T0 - T2	,433000	6,224368	8,375632	2	,001
Par 3	T0 - T3	,428106	7,258860	9,385806	2	,001

Note: En la tabla VI, se evidencia que la sig. (bilateral) de las muestras emparejadas (Par 1 T0-T1) cuyo valor sig. es 0.02, (Par 2 T0-T2) cuyo valor sig. es 0.01 y (Par 3 T0-T3) cuyo valor sig. es 0.01, tienes valores menores a 0.05, por tanto, podemos concluir que en cuanto a las características físicas del tallo en esas muestras emparejadas si producen cambios significativos al completar el proceso de absorción de cadmio en el suelo contaminado.

E. Análisis estadístico en concentración de cadmio en suelos contaminados.

TABLA VII
PRUEBA ANOVA PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE Cd EN SUELOS CONTAMINADOS.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	5727,402	3	1909,134	5072,874	<0,001
Dentro de grupos	3,011	8	,376		
Total	5730,413	11			

Note: En la tabla VII, se evidencia que la sig. tiene un valor de 0.001 que es menor a 0.05 por tanto podemos concluir que al menos una de las medias es diferente

TABLA VIII
PRUEBA DE SCHEFEE PARA COMPARACIÓN DE MEDIAS.

(I) TRATAMIENTOS SUELO	(J) TRATAMIENTOS SUELO	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0	1	-19,67667*	,50089	,000	-21,4261	17,9272
	2	-39,15000*	,50089	,000	-40,8994	37,4006
	3	-58,64333*	,50089	,000	-60,3928	56,8939
1	0	19,67667*	,50089	,000	17,9272	21,4261
	2	-19,47333*	,50089	,000	-21,2228	17,7239
	3	-38,96667*	,50089	,000	-40,7161	37,2172
2	0	39,15000*	,50089	,000	37,4006	40,8994
	1	19,47333*	,50089	,000	17,7239	21,2228
	3	-19,49333*	,50089	,000	-21,2428	17,7439

3	0	58,64333*	,50089	,000	56,8939	60,3928
	1	38,96667*	,50089	,000	37,2172	40,7161
	2	19,49333*	,50089	,000	17,7439	21,2428

Note: En la tabla VIII, se evidencia que en todas las comparaciones múltiples de los tratamientos comparados entre sí tienen un valor de sig. de 0.000 cuyo valor es menor a 0.05 por tanto podemos concluir que existe influencia significativa en la remoción de cadmio en suelos contaminados.

IV. DISCUSIONES

A. Discusión

El análisis del crecimiento de *Lupinus mutabilis* Sweet (tarwi) en suelos contaminados con diferentes concentraciones de cadmio revela importantes insights sobre la capacidad de esta especie para tolerar y acumular metales pesados. Se utilizaron cuatro tratamientos con concentraciones crecientes de cadmio: 0 mg/kg (T0 - control), 25 mg/kg (T1), 45 mg/kg (T2) y 65 mg/kg (T3). Los resultados obtenidos a los 18 días después de la exposición indican que el crecimiento del tarwi en términos de longitud de raíz, tallo y hoja varió en función de la concentración de cadmio en el suelo.

El tratamiento T0, que no contenía cadmio, mostró un crecimiento robusto, con una longitud promedio de raíz de 13.63 cm, tallo de 21.47 cm y hojas de 2.37 cm. A medida que aumentaba la concentración de cadmio, se observó una reducción progresiva en el crecimiento de las raíces, siendo más pronunciada en T3 (2.5 cm de raíz), lo que sugiere un efecto tóxico directo del cadmio en el desarrollo radicular. Este patrón concuerda con estudios previos, como el de la referencia [4], quienes afirmaron que los iones de Cd se retienen predominantemente en las raíces, limitando su transporte a otros órganos de la planta. La referencia [10] también corroboró esta tendencia al señalar que el contenido de Cd en las plantas sigue el orden: raíces > tallos > hojas > frutos > semillas, lo que explica la menor afectación observada en tallos y hojas en comparación con las raíces.

A pesar de la disminución en el crecimiento de la raíz, los tallos y hojas mostraron una mayor resistencia al cadmio, con variaciones mínimas entre los tratamientos T1 y T2. Sin embargo, T3 presentó una reducción notable, lo que sugiere que concentraciones de cadmio superiores a 45 mg/kg comienzan a afectar el crecimiento aéreo del tarwi, posiblemente debido a un efecto acumulativo del estrés oxidativo causado por la exposición prolongada a niveles tóxicos de cadmio. La referencia [4] reportó resultados similares, destacando que el cadmio provoca una disminución en la longitud de tallos y raíces en *Lupinus mutabilis*, aunque en nuestro estudio se observó que el tallo es más resiliente que la raíz frente a concentraciones moderadas de cadmio.

En cuanto a la capacidad de *Lupinus mutabilis* Sweet para la fitorremediación, los resultados obtenidos indican que esta especie tiene un potencial significativo para la remoción de cadmio del suelo, aunque su eficacia disminuye con concentraciones más altas. Se observó un porcentaje de remoción de cadmio de 22% en T1, 14% en T2 y 10% en T3, lo que sugiere que la eficiencia de absorción de cadmio por parte de las plantas decrece a medida que aumenta la

concentración del metal en el suelo. Este comportamiento puede explicarse por el estrés fisiológico inducido por el cadmio, que afecta la capacidad de la planta para absorber y acumular metales, como lo indican [10] y [14], quienes han documentado que el incremento de la concentración de cadmio disminuye el índice de tolerancia de las plantas debido a alteraciones en la membrana plasmática y en la absorción de elementos esenciales.

El análisis radicular muestra que las raíces son el principal sitio de acumulación de cadmio, coincidiendo con las observaciones de la referencia [12], quienes concluyeron que el cadmio ingresa primero a las raíces, siendo estas las primeras en sufrir daños debido a la alta afinidad del cadmio por los sitios de unión en las raíces. Este hallazgo es consistente con el modelo de fitorremediación descrito por la referencia [2], donde las raíces desempeñan un papel crucial en la inmovilización de contaminantes a través de la absorción y precipitación en el área radicular.

En conclusión, el estudio demuestra que *Lupinus mutabilis* Sweet tiene un potencial considerable para ser utilizado en la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio, aunque la eficacia de esta planta disminuye con concentraciones elevadas del metal. Los resultados resaltan la importancia de comprender los mecanismos de tolerancia y acumulación de cadmio en *Lupinus mutabilis* para optimizar su uso en programas de rehabilitación ambiental y sugiere la necesidad de investigaciones adicionales para explorar las interacciones entre el cadmio y otros metales pesados en condiciones de campo a largo plazo.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos revelan cambios significativos en las características físicas de *Lupinus mutabilis* Sweet (tarwi), especialmente en la longitud del tallo y la raíz, en todos los tratamientos con cadmio. Se concluye que la concentración de cadmio en el suelo influye de manera inversamente proporcional al crecimiento del tarwi, es decir, a mayor concentración de cadmio, menor es el crecimiento de la planta. Este hallazgo subraya la sensibilidad del sistema radicular de *Lupinus mutabilis* al estrés inducido por metales pesados.

En cuanto a las hojas de *Lupinus mutabilis*, no se observaron cambios significativos en su crecimiento entre los diferentes tratamientos. El tratamiento T2, con una concentración intermedia de cadmio, mostró un crecimiento foliar similar al del tratamiento de control (T0), donde no se adicionó cadmio. Se concluye, por tanto, que la concentración de cadmio en el suelo no tiene un impacto significativo en el crecimiento de las hojas del tarwi, lo que sugiere una mayor resiliencia de los tejidos foliares frente a la presencia de este metal.

Se logró determinar que *Lupinus mutabilis* Sweet actúa como un agente fitorremediador efectivo, reduciendo las concentraciones de cadmio en los suelos agrícolas contaminados. Al comparar las concentraciones iniciales y

finales de cadmio en los suelos, se concluye que la especie es capaz de absorber y acumular cadmio, contribuyendo así a la descontaminación de suelos afectados por este metal.

Los porcentajes de remoción de cadmio observados fueron del 22% en T1, 14% en T2, y 10% en T3, a los 18 días de iniciado el tratamiento. Estos resultados permiten concluir que la eficiencia de fitorremediación de *Lupinus mutabilis* Sweet disminuye a medida que aumenta la concentración de cadmio en el suelo. Sin embargo, la especie sigue mostrando un efecto significativo en la reducción de cadmio en suelos contaminados, destacando su potencial para ser utilizada en programas de remediación ambiental.

REFERENCIAS

- [1] Aguirre, Z (2019) Guía de especies vegetales del bosque tropical húmedo. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/ZhofreAguirre/publication/333653515_GUIA_DE_ESPECIES_VEGETALES_DEL_BOSQUE_TROPICAL_HUMEDO/links/5cfa66ada6fdccd130890e74/GUIA-DE-ESPECIES-VEGETALES-DEL-BOSQUE-TROPICAL-HUMEDO.pdf
- [2] Delgado, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011) Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Universidad Autónoma de Hidalgo, Hidalgo, México. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- [3] Gamarra, G., Munive, R., Munive, Y., Puertas, F., Valdiviezo, L. & Cabello, R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. En revista Scielo, 11 (2). Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v11n2/2077-9917-agro-11-02-177.pdf>
- [4] Gonzales, M (2016) Mejoramiento de la Fitoextracción en plantas nativas en suelos contaminados por actividades mineras en puchuncaví y quintero. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. Barcelona, España. Recuperado de: file:///C:/Users/User/Downloads/MIGM_TESIS.pdf
- [5] Hernández (2012). Métodos de análisis de datos. Universidad de la Rioja. Vitivinícola, España. Recuperado: https://www.unirioja.es/cu/zeherman/docencia/MAD_710/Lib489791.pdf
- [6] Hinojosa, S (2018) Fitoestabilización de cadmio por *Lupinus mutabilis* en un suelo contaminado del distrito de Mantaro, Jauja. Tesis para optar el título profesional de ingeniería ambiental. Universidad Continental, Huancayo, Perú. Recuperado de: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4918/2/IV_FIN_107_TE_Hinojosa_Zarate_2018.pdf
- [7] INEA. (2019). Superficie Agrícola Nacional por Departamento. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/inea/indicadores/superficie-agricola-nacional-segun-departamento-2020/>
- [8] INEA. (2019). Superficie de Ecosistemas degradados por región natural. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/inea/indicadores/superficie-de-ecosistemas-degradados-por-region-natural-segun-tipo-2019-hectareas/>
- [9] Marrero, J., Amores, I & Coto, O. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. En revista redalyc.org, 46 (3). Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223124988007>
- [10] MINAM. (2017). Estándares de Calidad del Suelo. Recuperado de [file:///C:/Users/User/Downloads/011-2017-minam%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/011-2017-minam%20(1).pdf)
- [11] Monje. C. (2011) Metodología de la investigación cualitativa y cuantitativa. Universidad Sur Colombia. Nieva, Colombia. Recuperado de: <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>
- [12] Murillo, J. (2018). EL MÉTODO EXPERIMENTAL. Recuperado de <https://www4.ujaen.es/~eramirez/Descargas/tema6>
- [13] Papuico, R (2020) Fitorremediación de un suelo contaminado con cadmio, utilizando *Lupinus mutabilis* y estiércol de lombriz. Huancani, Jauja. Tesis para optar el título profesional de ingeniería ambiental. Universidad Continental, Huancayo, Perú. Recuperado de: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8548/4/IV_FIN_107_TE_Papuico_Manrique_2020.pdf
- [14] Tapia, M. (2015) El tarwi, lupino andino. Recuperado de: <http://fadvamerica.org/wp-content/uploads/2017/04/TARWI-espanol.pdf>
- [15] Torres V, Y., Rojas, A., Salas, W., & Hinojosa, R (2021). Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. En revista Scientific Research Journal, 1 (1). Recuperado de <http://srjournalcidi.org/index.php/ojs/article/view/43/27>
- [16] Klimovsky, G (1971). El método hipotético deductivo y la lógica. Recuperado de: <https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/libros/pm.177/pm.177.pdf>
- [17] Zabaleta, A (2018) *Lupinus mutabilis* (Tarwi) Leguminosa andina con gran potencial industrial. 1.a ed. Lima, Pág. 9-12: Fondo Editorial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de: <https://fondoeditorial.unmsm.edu.pe/index.php/fondoeditorial/catalog/download/216/199/900-1?inline=1>