

La fitorremediación de suelos contaminados por relaves mineros a través de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum*

Phytoremediation of soils contaminated by mine tailings by means of *Dactylis glomerata* and *Pennisetum clandestinum*

Janeth Yvonne Vizconde Suárez¹

Recibido: 30/06/2023 - Aprobado: 12/10/2023 – Publicado: 15/12/2023

RESUMEN

El relave de una planta minera en Perú está muy contaminado por metales pesados, contiene niveles tóxicos de Al, Cd, Cu, Pb y Zn, presenta riesgo ambiental elevado. Por lo cual se realizó la fitorremediación a través de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* a escala invernadero para la recuperación del suelo. El estudio fue cuantitativo, explicativo y experimental. Para la toma de muestra se consideró el muestreo selectivo y método de la Línea de Intercepción. Los resultados indican que las dos especies vegetales en suelos contaminados con relave de la minería tienen eficiencia fitorremediadora por exclusión superior al 99% ($p > 0.001$), inmovilizando los metales bajo la forma no soluble. Se concluye que la asociación de las dos especies tiene como destino mayoritario de metales pesados a la raíz y la rizósfera (como metal no disuelto), lo que las convierte en plantas fitoestabilizadoras exclusoras.

Palabras claves: Fitorremediación, Suelo contaminado, *Dactylis glomerata*, *Pennisetum clandestinum*, relave

ABSTRACT

The tailings of a mining plant in Peru are highly contaminated by heavy metals, containing toxic levels of Al, Cd, Cu, Pb and Zn, presenting a high environmental risk. Therefore, phytoremediation was carried out using *Dactylis glomerata* and *Pennisetum clandestinum* on a greenhouse scale for soil recovery. The study was quantitative, explanatory and experimental. Selective sampling and the Interception Line method were used for sampling. The results indicate that the two plant species in soils contaminated with mining tailings have a phytoremediation efficiency by exclusion higher than 99% ($p > 0.001$), immobilizing metals under the non-soluble form. It is concluded that the association of the two species has the root and rhizosphere as the main destination of heavy metals (as undissolved metal), which makes them exclusion phytostabilizing plants.

Keywords: Phytoremediation, Contaminated soil, *Dactylis glomerata*, *Pennisetum clandestinum*, tailings

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú

E-mail: jvizconde11@gmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1604-5057>

I. INTRODUCCIÓN

La minería consiste en la extracción de minerales. En Perú, es polimetálica, fundamentalmente de metales básicos no ferrosos (Cu, Zn, Pb, Sn) y preciosos (Au, Ag). Se clasifica en gran minería, mediana, pequeña y artesanal (Torre et al., 2022, p. 282), estos derivan altas concentraciones tóxicas (Terrones-Saeta et al., 2021, p. 1; Astete et al., 2009, como se citó Llacza & Castellanos, 2020, p. 38).

Los relaves pueden eliminar la vida acuática y terrestre, por tener plomo, mercurio, arsénico, etc. (Canales-Gutiérrez, 2021, p. 67). En varios países, su manejo no está regulado, por ello no se aplican tecnologías eficientes para evitar contaminar ríos, lagos y suelos agrícolas (Canales-Gutiérrez, 2021, p. 67). El impacto medioambiental por relave minero es inevitable, sobre todo en la degradación de suelos, agua y aire. Tiene efectos negativos en la economía y en los productos agrícolas de consumo humano (Menéndez & Muñoz, 2021, p. 150).

Muchas mineras dejaron de operar, pero, sus residuos son un problema que requieren tecnologías para remediarlo (Martínez-Manchego et al., 2021, p. 162). Estos residuos se generaron en el pasado porque no había leyes ambientales. Pese a ello, en la actualidad, no son controlados debido al desinterés, falta de conocimiento y experiencia (Romero et al., 2012, p. 14). El Perú posee grandes depósitos mineros en abandono, creando problemas ambientales y sociales, los cuales no cuentan con planes de mitigación del Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

La contaminación del suelo sucede si el reciclado de metales no es eficiente, donde los metales liberados terminan muchos años en la capa superficial del suelo. Sin embargo, también han sido liberados a la atmósfera o canales, terminando como contaminantes difusos en suelos y sedimentos (Romero et al., 2012, p. 14). Por ello, en la última década, nace una alternativa económicamente sólida y favorable, la fitorremediación que usa plantas para limpiar el medio ambiente porque pueden extraer, acumular y descontaminar el sustrato (suelo, aire y agua) de los contaminantes a través de procesos físicos, químicos o biológicos (Sharma et al., 2023, p. 2).

La fitorremediación es una buena técnica para recuperar suelos contaminados, siendo clave la selección de especies y vegetales con capacidad de absorber, metabolizar, acumular y estabilizar metales pesados (Dorronsoro & García, 2005 como se citó en Arce et al., 2021, p. 70; Simón & Mayet, 2017, p. 181; López & Morales, 2022, p. 25). Es de bajo coste, socialmente aceptable y sostenible (Khan et al., 2023, p. 14; López & Morales, 2022, p. 25). Involucra fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización y rizofiltración (Sharma et al., 2023, p. 2; López & Morales, 2022, p. 25; Kaffle et al., 2022, p. 2). Varias especies son hiperacumuladoras de metales pesados, pero requieren mucha agua para su desarrollo (Simón & Mayet, 2017, p. 181), por ello, identificar este tipo de plantas es de gran interés (Guzmán et al., 2021, p. 44).

En el Perú, la zona altoandina del departamento de Arequipa soporta riesgos ambientales por los relaves mineros que con urgencia requieren la implementación de planes de remediación (Martínez-Manchego et al., 2021, p. 162). Asimismo, en la ciudad de la Oroya-Junín se ha comprobado que los suelos frente al Complejo Metalúrgico presentan plomo, llegando a valores máximos tan altos que pasan los 9 000 mg/kg de suelo, superando en todo sentido el Estándar de Calidad del suelo peruano para vivienda, inclusive superando en un 87% el Estándar de Calidad para suelos comerciales, industriales y extractivos (Arce & Calderón, 2017, p. 54).

Este estudio analizó una planta minera en Perú donde Pérez et al. (2020) halló aluminio (Al) con 0.290 mg/l fuera del límite permitido, el Arsénico (As) con 7.210 mg/l y el hierro (Fe) con 2.390 mg/l superando los LMP, el mercurio Hg < 0.025 mg/l, el plomo (Pb) < 0.010 mg/l y el cadmio Cd < 0.002 mg/l dentro de los parámetros de LMP; por lo que se puede decir que la planta minera presenta alto riesgo ambiental (p. 217). A su vez, Chang et al. (2018) mencionó que contiene niveles tóxicos de Al, Cd, Cu, Pb y Zn. También, indicó que en esta planta el metal Cd fue 36 veces superior a la Norma Nacional de Calidad Medioambiental (NCA); en cuanto al Pb esta planta concentradora excedió el límite máximo de detección (> 5 000 mg/kg). Considerando también las concentraciones de Cu (1 187 mg/kg), Ni (8.70 mg/kg), y Zn (7 100 mg/kg).

Este estudio pretende determinar el nivel de eficiencia de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* en el sistema fitorremediador para la recuperación del suelo del relave de una planta minera en Perú, debido a que los pastos de pradera tienen potencial en la fitorremediación de suelos contaminados por su sistema de raíces fibrosas (Zhu et al., 2019, p. 50). El *Dactylis glomerata* conocido como pasto azul (Benalcázar-Carranza, 2021; Quishpe et al., 2021) y como pasto oville (Borowik et al., 2020; Quezada et al., 2020) se planta con otras gramíneas y leguminosas para reducir la erosión (Heuze et al., 2015, como se citó en Gajić et al., 2020, p. 3). Asimismo, Quishpe et al. (2021) constató que el pasto azul obtuvo 96 % de efectividad para absorber Arsénico (As) (p. 182) porque *Dactylis glomerata* posee un alto potencial adaptativo ecofisiológico que le permite crecer y sobrevivir en sitios contaminados con As, por lo cual se considera una planta adecuada para la fitorremediación sostenible (Gajić et al., 2020, p. 19). A su vez, *Dactylis glomerata* es útil para degradar hidrocarburos DO (Borowik et al., 2020, p. 1).

Por su parte, *Pennisetum clandestinum* conocido como Pasto Kikuyo (Huamani, 2017, p. 122; Mejía, 2019, p. 1069) tiene buena tolerancia a la sequía, el calor y la salinidad. Por lo tanto, es importante para la utilización y recuperación de áreas salinizadas para ser utilizadas como cobertura potencial del suelo y como pasto forrajero (Musculo et al., 2013, p. 56; Díaz et al., 2012, p. 89). La fitorremediación con esta planta influye en la recuperación de los suelos, al disminuir la presencia de metales contaminantes y mejorando la calidad del suelo (Huamani, 2017, p. 122). También, se ha demostrado que el kikuyo es efectivo en la remoción de plomo de aguas contaminadas (Maldonado et al., 2012, p. 56).

II. MÉTODO

La investigación fue cuantitativa, aplicada, explicativa y experimental donde se comparó sustratos con distintas proporciones de relave y tierra agrícola con dos especies vegetales para determinar la capacidad de inmovilización de los metales y sus características fitoremediadoras en la recuperación de la calidad del suelo. La población fue la comunidad vegetal de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum*, a escala de invernadero, considerando como muestra 1 kg de sustrato de cada terrario del tratamiento M1, M2, M3 y MC y de la comunidad vegetal: (a) El total de la parte foliar de cada terrario, (b) El total de la parte radicular de cada terrario.

2.1 Métodos de toma de muestra de suelo

El Muestreo fue selectivo (Canadian Council of Ministers of the Environment [CCME], 1993) y el Método de la Línea de Intercepción (Coulloudon et al., 1999), se escogieron sitios con diferencias obvias a través de evaluaciones visuales y criterios técnicos, considerándose factores como los cambios de color superficial del suelo, áreas de perturbación física o áreas sin vegetación o con vegetación muerta, también se consideró el área foliar (superficie de hoja de la especie) y la composición de la cubierta (porcentaje de cobertura de cada especie).

2.2 Colecta de las muestras de suelos contaminado (relave)

Para el muestreo se contó con la guía de recolección de muestras (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014), con ello se determinó el área de estudio relavera de la planta minera, subdividida en unidades homogéneas (muestreo por cuarteo) para controlar la variabilidad de los atributos de interés (vegetación, erosión, etc.). Para la recolección de las muestras se hicieron calicatas de 50 cm y 15 cm de radio, se extrajo porciones de suelo para apilarlas y se realizó el cuarteo, operación que se repite tantas veces que sea necesario hasta obtener una muestra de 50 kg; se llenaron cinco bolsas de polietileno densa y todas las muestras se secaron a temperatura ambiental protegida de la lluvia (Figura 1). Luego se hizo el trabajo de laboratorio, donde las muestras se tamizaron,

uniformizaron y homogenizaron. Finalmente, el trabajo de campo (remediación en invernadero), consistió en el acondicionamiento de macetas de prueba.

2.3 Técnica e Implementación del Bioensayo

Se desarrolló el proyecto a través de bioensayo con especies vegetales, observando la capacidad fitoremediadora del suelo contaminado. En el invernadero se acondicionó el relave con tierra agrícola y arena en cuatro macetas. El sustrato se compuso de 70 kg de tierra agrícola. La muestra se tamizó y se retiró piedras, 50 kg de muestra compósita de relave, recolectada a una profundidad de 15 cm y 25 kg de arena fina, previamente tamizada para mayor uniformidad de partículas. En ello se plantó y crecieron las especies vegetales. La proporción utilizada para el grupo control fue tierra agrícola y arena (5:1) y para los grupos experimentales (terrarios) diversas proporciones.

También, se recolectó 140 esquejes de *Pennisetum clandestinum* y 200 gr de semillas de *Dactylis glomerata*. Luego, se sembró en cada terrario 50 gr de *Dactylis glomerata* con 35 esquejes de *Pennisetum clandestinum* (Figura 2). Después, se registró la temperatura ambiental y humedad en el invernadero. El tratamiento duró 5 meses, se regó con orina humana diluida en agua, en proporción 1:8, con una frecuencia semanal. Se obtuvo datos del análisis de laboratorio de la medición de metales disponibles, para la muestra de suelo homogenizado.

2.4 Análisis químico

Se procedió a la colecta de muestras por cada grupo (suelo, parte aérea y parte radicular). Las muestras de suelo fueron de 1/2 kg. Las muestras aéreas y de raíces fueron cosechadas cuidadosamente, las raíces fueron lavadas y secadas. Las muestras se enviaron al laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C., certificado por el Servicio Nacional de Acreditación INDECOPI – SNA con Registro LE-047 (Servicios Analíticos Generales S.A.C., 2021); donde se determinó las concentraciones de metales pesados por espectroscopía de masas acoplada inductivamente a plasma (ICP-MS), lo cual permitió la detección de ultra trazas de metales.

Figura 1

Colecta de muestras de relave de una planta concentradora en Perú.



Figura 2

Siembra de *Dactylis glomerata* con 35 esquejes de *Pennisetum clandestinum*.



III. RESULTADOS

3.1. Análisis de Biomasa

3.1.1. Altura

Dactylis glomerata y *Pennisetum clandestinum* tienen un crecimiento similar en los grupos experimentales con una media semanal entre 0.91 cm y 1.70 cm aproximadamente, la altura varió según el porcentaje de relave en cada tratamiento; no obstante, el grupo de control (MC) y el grupo experimental con menor proporción de relave (M3) tienen mayor altura MC25 (56 cm) y M325 (42.2 cm), mientras que en M125 y M225 la altura fluctuó entre 21.5 cm a 30 cm.

3.1.2. Biomasa

El muestro de plantas (parte aérea y radicular), después de limpiarlas, se secaron en una estufa a 70°C; enfriándose en un desecador y posteriormente pesadas en una balanza de precisión.

3.2. Análisis Físico Químico

3.2.1. Caracterización Físicoquímica inicial de los sustratos

Tabla 2 exhibe la caracterización físicoquímica de los sustratos (M1, M2 y M3) y (MC). En donde las condiciones iniciales fueron las adecuadas para el cultivo de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* porque se cumplió con los requisitos de suelos de uso agrícola.

3.2.2. Concentración de metales en los sustratos: Inicial y final

La Tabla 3 exhibe que la concentración de metales luego del experimento se ha reducido, existe mayor reducción en el sustrato M3, seguido por M2 y M1, a excepción de la plata y arsénico, donde la mayor reducción fue en el sustrato M2, seguido por M3 y M1. Se observa que para

el cobre, plomo y zinc la reducción en el sustrato M3 está alrededor del 94% a 97%.

3.2.3. Categorización del *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* en los sustratos, raíz y parte aérea

La Tabla 4 evidencia que la concentración de metales en el sustrato es siempre mayor a las concentraciones en la raíz, lo que indica que *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* son plantas indicadoras porque la concentración del metal pesado es mayor en el sustrato que en la raíz y, a la vez, la concentración del metal pesado es mayor en la raíz que en la parte aérea.

3.2.4. Categorización de las plantas en los sustratos

La Tabla 5 muestra que las plantas en el sistema fitorremediador son indicadoras, llegando a ser tolerantes en el sustrato de control para plata, cadmio, cobre, plomo y zinc

3.2.5. Factor de Translocación

La Tabla 6 reporta valores de TF inferiores a 1, lo que significa que las plantas son fitoestabilizadoras en la raíz; los resultados de concentración final de metales en la vegetación confirman esta aseveración porque la concentración de metales es mayor en la raíz que en la parte aérea.

3.2.6. Factor de Bioconcentración

En la Tabla 7 muestra que en el sustrato M1 y M2, tanto el *Dactylis glomerata* como el *Pennisetum clandestinum* se comportan como excluyentes, M3 es excluyente para Ag, As y Ni y acumuladora para Cd, Cu, Pb y Zn y en el Control, los valores del BFC para la raíz muestran que para As y Ni las plantas se comportan como excluyentes y para el Ag, Cd, Cu, Pb y Zn son acumuladoras.

Tabla 1
Peso total seco de las especies vegetal

Especie vegetal	Cortes	MC	M1	M2	M3
<i>Dactylis glomerata</i> y	8 semanas	142.5	83.4	129.2	134.3
<i>Pennisetum</i>	16 semanas	168.2	98.4	145.2	152.2
<i>clandestinum</i>	25 semanas	169.2	102.2	149.4	134.6
Peso total (gr)		479.9	284	423.8	421.1

Tabla 2
Características Fisicoquímicas de los sustratos usados en el experimento

Parámetro	Unidad	Sustrato por grupo			
		M1	M2	M3	MC
Arena	%	73	71	69	68
Arcilla	%	8	10	11	12
Limo	%	19	20	20	20
Textura		Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso
Porosidad	%	42	47	45	50
pH		7.1	7.4	7.5	6.9
Conductividad	dS/m	2	1.3	0.9	0.5
Capacidad de Intercambio Catiónico	me/100gr	44.3	29	21.3	13.7
Nitrógeno Total	mg/kg	146.8	438.1	584	729.7
Fosforo disponible	mg/kg	9	10.7	11.4	12.1
Materia orgánica	%	4.3	5	6.3	6.7

Tabla 3
Peso total seco de las especies vegetal

Metales (mg/Kg)	M1			M2			M3			MC										
	M. Totales		M. Disueltos	IS	M. Totales		M. Disueltos	IS	M. Totales		M. Disueltos	IS								
	I	F	I		F	I	F		I	F	I		F	%						
Ag	14.82	14.55	<0.035	<0.035	98.1	12.41	6.59	0.035	<0.035	62.6	9.24	6.59	<0.035	<0.035	71.3	0.07	0.02	<0.035	<0.035	30.53
As	>3000	>3000	0.9	1.3	100	2665.1	14.6	4.7	9.1	66.3	2162	1647.7	8.4	9.1	76.2	6.84	5.41	0.13	0.18	79.02
Cd	11.22	9.99	2.47	1.31	89	8.5	1.67	0.66	0.31	85.8	5.74	1.67	0.09	0.31	29	0.03	0.04	0.02	<0.002	110.3
Cu	124.19	107.82	0.31	1.79	86.8	81.17	4.25	0.52	0.38	91.1	71.29	4.25	0.79	0.38	5.96	1.29	1.03	0.05	0.05	79.37
Ni	5.74	5.59	1.26	0.5	97.4	5.4	4.3	0.27	0.15	79.6	7.98	4.3	1.39	0.15	53.9	0.4	0.32	0.03	0.01	80.4
Pb	2129.4	2079.2	1.1	0.44	97.6	1780.8	38.2	0.86	0.44	69	1189.2	38.15	1.61	0.44	3.21	3.86	2.81	0.02	0.01	72.85
Zn	2225.4	1945.1	273.5	122.25	87.4	1492.5	59.9	139.3	63.15	82.1	1050.2	59.9	22.15	63.15	5.7	8.81	8.31	0.25	0.11	94.38

Nota: I = Inicial; F = Final; Plata = Ag; Arsénico = As; Cadmio = Cd; Cobre = Cu; Níquel = Ni; Plomo = Pb; Zinc = Zn.

Tabla 4
Metales totales en sustrato, raíz y parte aérea

	M1			M2			M3			MC		
	M1f	R	PA	M2f	R	PA	M3f	R	PA	MC	R	PA
Plata	14.545	2.26	0.14	7.77	1	0.07	6.585	0.28	0.06	0.02	0.075	0.006
Arsénico	3000	99.75	1.2	1766.25	38.6	0.95	1647.65	14.55	3.5	5.405	2.25	0.07
Cadmio	9.985	4.6	0.085	7.29	3.065	0.2	1.665	1.665	0.44	0.037	0.225	0.0004
Cobre	107.82	43.34	2.18	73.97	8.69	2.42	4.25	4.25	2.62	1.026	2.585	0.2
Níquel	5.59	0.97	0.19	4.3	0.4	0.32	4.3	0.32	0.26	0.32	0.046	0.0185
Plomo	2079.23	285.6	2	1228.5	141.86	2.6	38.15	38.15	5.565	2.809	5.465	0.13
Zinc	1945.1	255.2	12.85	1225.4	146.3	40.1	59.9	59.9	34.35	8.31	21.1	0.735

Tabla 5
Categorización de las plantas en los sustratos

METAL	CLASIFICACIÓN			
	M1	M2	M3	MC
Plata	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Tolerante
Arsénico	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Indicadora
Cadmio	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Tolerante
Cobre	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Tolerante
Níquel	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Indicadora
Plomo	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Tolerante
Zinc	Indicadora	Indicadora	Indicadora	Tolerante

Tabla 6
Factor de Translocación (TF)

	TF1	TF2	TF3	TF-MC
Plata	0.031	0.06	0.5	0.08
Arsénico	0.01	0.091	0.08	0.031
Cadmio	0.043	0.144	0.05	0.002
Cobre	0.056	0.301	0.51	0.077
Níquel	0.33	0.65	0.59	0.407
Plomo	0.009	0.039	0.05	0.024
Zinc	0.157	0.235	0.21	0.035

Tabla 7
Clasificación del Factor de Bioconcentración

	M1		M2		M3				MC							
	BFC-R	C	BFC-PA	C	BFC-R	C	BFC-PA	C	BFC-R	CLASF	BFC-PA	C	BFC-R	C	BFC-PA	C
Ag	0.155	E	0.005	E	0.129	E	0.008	E	0.043	E	0.02	E	3.75	A	0.3	E
As	0.033	E	0	E	0.022	E	0.002	E	0.009	E	0	E	0.416	E	0.01	E
Cd	0.461	E	0.02	E	0.42	E	0.06	E	1	A	0.05	E	6.164	A	0.01	E
Cu	0.402	E	0.022	E	0.117	E	0.035	E	1	A	0.51	E	2.521	A	0.2	E
Ni	0.174	E	0.057	E	0.093	E	0.06	E	0.074	E	0.04	E	0.142	E	0.06	E
Pb	0.137	E	0.001	E	0.115	E	0.005	E	1	A	0.05	E	1.946	A	0.05	E
Zn	0.131	E	0.021	E	0.119	E	0.028	E	1	A	0.21	E	2.539	A	0.09	E

IV. DISCUSIÓN

Luego de aplicar el experimento con *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* en suelos contaminados con relave minero bajo condiciones de invernadero se obtuvo eficiencia fitorremediadora por exclusión superior al 99% ($p > 0.001$), inmovilizando los metales bajo la forma no soluble. Esto es similar a Quispe y Quispe (2020) quienes señalaron que la fitorremediación con Pasto Ovillo y Alfalfa de Dormancia WL 350 mejoró los suelos contaminados. Asimismo, Huamani (2017) constató que la fitorremediación con Kikuyo influye en la recuperación de los suelos afectados por relaves mineros (p. 122).

Con respecto a los resultados de las propiedades fisicoquímicas de los sustratos expuestos en la Tabla 2, donde se detalló la porosidad de los sustratos preparados que van de 58% (Sustrato Control) a 47% (M2), variable que permitió determinar la capacidad de infiltración del agua como transporte de nutrientes, dicho resultado se

respalda en Domínguez (2000) quien mencionó que una porosidad total del orden del 40 a 50 % es satisfactoria para el desarrollo vegetal (como se citó en Silva, 2020, p. 18). Asimismo, los valores de textura permitieron clasificar a los sustratos como francoarenosos; el pH mostró una tendencia a la neutralidad 6.9 (C) a 7.5 (M3); la conductividad varió de 0.5 para el Control a 2 dS/m para M1 que acorde con Quispe y Quispe (2021) el “mejor desarrollo de los pastos asociados se da cuando el pH del suelo varía entre 5.5 a 7.5” (p. 21). Las concentraciones de MO (materia orgánica) de 6.3% (M1) a 6.7% (C) variable que indicó la inmovilización de metales por reacciones de complejación. Este resultado guarda relación con Quispe y Quispe (2021) quien encontró que la materia orgánica junto con la utilización de Pasto Ovillo y alfalfa WL 350 mejoró los suelos contaminados con metales pesados.

Las concentraciones más altas de metales en las raíces se encuentran en las plantas de los sustratos M1 y M2 donde Pb (285.6 mg/L y 141.86 mg/L), Zn (255.2 mg/L y 146.30

mg/L) y As (99.75 mg/L y 38.6 mg/L). Concordando con Duran (2011) quien encontró elevado contenido de Zn que superó dos veces el contenido normal en la raíz de *Dactylis glomerata* crecida en Pb6. Las plantas que crecieron en PB6 y Pb7 acumularon metales básicamente en la raíz.

En cuanto a los resultados de contenido de metales en la parte aérea de las plantas, las que tienen mayor concentración son los sustratos M2 y M1, Zn (34.35 mg/kg y 40.10 mg/kg), Pb (5.57 mg/kg y 2.60 mg/kg), Cu (2.62 mg/kg y 2.42 mg/kg) y As (3.5 mg/kg y 0.95 mg/kg), evidenciando que las plantas tienen baja asimilación de metales. Por su parte, Duran (2010) encontró que las plantas crecidas en Pb8, acumularon metales pesados en la parte aérea, con excepción de Cu; no obstante, las diferencias no fueron significativas debido a que el sitio Pb8 tuvo mayor contaminación. Se comprobó que *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* son plantas indicadoras de contaminación, pues el contenido de los metales en el sustrato es mayor que en la raíz y esta es mayor a la concentración de metales pesados en la parte aérea.

Los resultados muestran que los valores de translocación de metales en los distintos sustratos son menores a 1, indicando que estas plantas son fitoestabilizadoras; para Ag (0.031 a 0.5), As (0.01 a 0.09), Cd (0.043 a 0.144), Cu (0.056 a 0.513), Ni (0.33 a 0.65), Pb (0.009 a 0.052) y Zn (0.157 a 0.235). De forma similar, Duran (2011) halló que todos los valores del índice FT de *Dactylis glomerata* crecidas en Pb6 y Pb 7 fueron menores a 1 indicando que es fitoestabilizadora; y acorde con Chamba-Eras et al. (2022) los valores de TF < 1 indican acumulación de metal en las raíces, mientras que los valores > 1 indican acumulación en las partes aéreas; también, un valor del TF < 1 indica que la translocación del metal es baja, por lo que se encuentra retenido en las raíces y puede usarse para fitoestabilización (Falcón, 2017). No obstante, un valor TF > 1 indica una eficiente translocación del metal a brotes, por lo cual la planta puede usarse para fitoextracción (Abaga et al., 2021). Inclusive, Pancorbo y Ruiz (2020) mencionaron que debido a que la planta no traslada de forma eficaz los metales pesados de la raíz a la parte aérea, por ende tiene un fuerte potencial fitoestabilizador. En el mismo sentido, Visconti et al. (2020) encontró que *Brassica juncea* y *Dactylis glomerata* tienen una mayor acumulación de PTE en las raíces que en los brotes (factor de transferencia <1) independientemente del tratamiento recibido. Por lo tanto, son buenos candidatos para la fitoestabilización de suelos mineros contaminados. En tanto Chang et al. (2018) obtuvieron un valor TF < 1 para la especie *Pennisetum clandestinum* indicando que es una planta con potencial fitoestabilizador: para Cd (0.48), Cu (0.73), Ni (0.67), pb (0.90); sin embargo, para Zn tuvo un TF > 1 por lo cual *Pennisetum clandestinum* tiene potencial para fitoextracción de Zn (1.14) en los suelos contaminados.

Los resultados del BCF en la raíz del *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum* son excluseras en el sustrato M1 y M2 (BCF < 1); y, el sustrato M3 es acumulador ($1 > \text{BCF} < 10$) para Cd (1.00), Cu (1.00), Pb (1.00) y Zn (1.00). También, Matanzas et al. (2021) mencionó que los valores de BCF > 1 indican acumulación

de un determinado oligoelemento en las raíces (p. 5). En paralelo, Salas-Luévano et al. (2017) demostró que el contenido de As y Pb en la vegetación sugiere que algunas especies de plantas tienen buena capacidad para tolerar y acumular As. Solo *Bouteloua gracilis* fue la más eficiente para absorber As, al igual que *A. hybridus*, *A. donax* y *Pennisetum clandestinum* (BCF = 0.8). Los resultados de BCF en la parte aérea de las plantas, en los distintos sustratos utilizados, el BCF < 1 indica que los pastos son plantas excluyentes, encontrándose los valores más altos en el sustrato M3 Ag (0.021), As (0.001), Cd (0.05), Cu (0.51), Ni (0.04), Pb (0.05) y Zn (0.21) que acorde con Corral (2021) las plantas excluyentes “son aquellas en las que la concentración del elemento (metal) en tallo y hojas son constantes” (p. 191).

V. CONCLUSIONES

Dactylis glomerata y *Pennisetum clandestinum* en suelos contaminados con relave minero bajo condiciones de invernadero evidenciaron eficiencia fitorremediadora por exclusión superior al 99% ($p > 0.001$), inmovilizando los metales bajo la forma no soluble.

La concentración de metales disponibles en suelos contaminados con relave se redujo entre 20 y 30% debido a la capacidad fitorremediadora de la asociación de estas especies.

La asociación de las especies analizadas tiene como destino mayoritario de metales pesados a la raíz y la rizósfera (como metal no disuelto), por lo que son plantas fitoestabilizadoras excluseras

VI. REFERENCIAS

- Abaga, N., Dousset, S., & Munier-Lamy, C. (2021) Phytoremediation Potential of Vetiver Grass (*Vetiveria Zizanioides*) in Two Mixed Heavy Metal Contaminated Soils from the Zoundweogo and Boulkiemde Regions of Burkina Faso (West Africa). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9, 73-88. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.911006>
- Arce, S. N., Calderón, J. M., & Jarecca, Y. (2021). Optimización del proceso de Fito remediación con *Festuca Dolichophylla* y tiosulfa to de amonio para mejorar la eficacia de la absorción del mercurio de suelos contaminados con mercurio por la minería del distrito de Ananea Puno-Perú. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 69–76. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21765>
- Arce, S., & Calderón, M. (2017). Suelos contaminados con plomo en la Ciudad de La Oroya- Junín y su impacto en las aguas del Río Mantaro. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 20(40), 48–55. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/14389>
- Benalcázar-Carranza, B. P., López-Fiallos, V. F., Gutiérrez-León, F. A., Alvarado-Ochoa, S., & Portilla-Narváez, A. R. (2021). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento de cinco pastos perennes en Ecuador. *Pastos y Forrajes*, 44, 1-9. <https://bit.ly/3oN2RS0>

- Borowik, A., Wyszowska, J., Kucharski, M., & Kucharski, J. (2020). The Role of *Dactylis Glomerata* and Diesel Oil in the Formation of Microbiome and Soil Enzyme Activity. *Sensors*, 20(12), 1-20. <https://doi.org/10.3390/s20123362>
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (1993). Guidance manual on sampling, analysis and data management for contaminated sites (Vol. 1). <https://bit.ly/41XZ8j5>
- Canales-Gutiérrez, A. (2021). Watersheds and mining tailings. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 9(2), 67-68. <https://bit.ly/3M1CJMx>
- Chamba-Eras, I., Griffith, D.M., Kalinhoff, C., Ramírez, J., & Gázquez, M. J. (2022). Native Hyperaccumulator Plants with Differential Phytoremediation Potential in an Artisanal Gold Mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11, Artículo 1186. <https://doi.org/10.3390/plants11091186>
- Chang, K. J., Gonzales, M.J., Ponce, O., Ramírez, L., León, V., Torres, A., Corpus, M., Loayza-Muro, R. (2018). Accumulation of heavy metals in native Andean plants: potential tools for soil phytoremediation in Ancash (Peru). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 33957–33966. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3325-z>
- Corral Ribera, M. (2022). Factor bioconcentración en *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle. Análisis preliminar. *Cuadernos Geográficos*, 61(1), 189–205. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.20952>
- Coulloudon, B., Eshelman, K., Gianola, J., Habich, N., Hughes, L., Johnson, C., Pellant, M., Podborny, P., Rasmussen, A., Robles, B., Shaver, S., Spehar, J., & Willoughby, J. (1999). Sampling Vegetation Attributes: Interagency Technical Reference. Department of Agriculture; Natural Resource Conservation Service; Grazing Land Technology Institute y U.S. Department of the Interior. <https://bit.ly/40WIDm8>
- Díaz, A.M., Díaz, J. E., & Vargas, O. (Eds.). Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente. <https://bit.ly/3oWuQ1G>
- Duran, (2011). Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana [Tesis doctoral, Universitat de Barcelona]. Repositorio institucional UB. <https://bit.ly/44sxm05>
- Falcon, J (2017). Fitoextracción de metales pesados en suelo contaminado con Zean mays L. en la estación experimental El Mantaro – Junín en el año 2016 [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4611>
- Gajić, G., Djurdjević, L., Kostic, O., Jaric, S., Stevanović, B., Mitrovic, M., & Pavlovic, P. (2020). Phytoremediation Potential, Photosynthetic and Antioxidant Response to Arsenic-Induced Stress of *Dactylis glomerata* L. Sown on Fly Ash Deposits. *Plants* 2020, 9(5), 1-27. <https://doi.org/10.3390/plants9050657>
- Guzmán, A. R., Oriol, P., Cruz, O., Valdés, R., & Valdés, P. A. (2021). Fitotecnología para la recuperación de agroecosistemas contaminados con metales pesados por desechos industriales. *Centro Agrícola*, 74(48), 4-52. <https://bit.ly/41HtAxM>
- Huamani, E. (2017). Fitorremediación de suelos afectados por relaves mineros a través de planta endémica Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y su influencia ambiental en la población de Saramarca - Palpa - Ica 2017 [Tesis de licenciatura, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio Institucional UAP. <https://bit.ly/429else>
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, Artículo 100203. <https://doi.org/grxw8d>
- Khan, I. U., Qi, S. S., Gul, F., Manan, S., Rono, J.K., Naz, M., Shi, X. N., Zhang, H., Dai, Z. C., Du, D. L. (2023). A Green Approach Used for Heavy Metals ‘Phytoremediation’ Via Invasive Plant Species to Mitigate Environmental Pollution: A Review. *Plants*, 12(4), 725. <https://doi.org/10.3390/plants12040725>
- Llaczka, H., F., & Castellanos, P. L. (2020). Hongos Filamentos de Relave Minero Contaminado con Plomo y Zinc. Hongos filamentos de relave minero contaminado con plomo y zinc. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 23(45), 37–42. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i45.18046>
- López, M. E., & Morales, O. E. (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: Una revisión. *Revista Ciencia Y Tecnología El Higo*, 12(2), 15-28. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197>
- Maiti, S. K., Kumar, A., Ahirwal, J., – Das, R. (2016). Comparative study on bioaccumulation and translocation of metals in bermuda grass (*Cynodon dactylon*) naturally growing on fly ash lagoon and topsoil. *Applied Ecology And Environmental Research*, 14(1): 1-12. https://www.aloki.hu/pdf/1401_001012.pdf
- Maldonado, A., Luque, S., Urquizo, D. (2012). Biosorción de plomo de aguas contaminadas utilizando *Pennisetum clandestinum* Hochst (Kikuyo). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, (S4), 52-57. <https://bit.ly/427LSYQ>
- Martínez-Manchego, L., Sarmiento-Sarmiento, G., & Bocardo-Delgado, E. (2021). Native plant species with potential for the phytoremediation of high-andean soils contaminated by residues from mining activity. *Bioagro*, 33(3), 161-170. <https://doi.org/10.51372/bioagro333.2>
- Matanzas, N., Afif, E., Díaz, T.E., Gallego, J.L.R. (2021). Screening of Pioneer Metallophyte Plant Species with Phytoremediation Potential at a Severely Contaminated Hg and As Mining Site. *Environments*, 8(7), 63. <https://doi.org/10.3390/environments8070063>
- Mejía, F., Yoplac, I., Bernal, W., & Castro, W. (2019). Evaluación de modelos de predicción de composición química y energía bruta de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) usando espectroscopía en infrarrojo cercano (NIRS). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(3), 1068-1076. <https://bit.ly/3Vj2ivu>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *PAIDEIA XXI*, 11(1), 141-154. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>

- Ministerio de Energía y Minas. (2019). Inventario de Pasivos Ambientales Mineros. <https://bit.ly/41XA63n>
- Ministerio del Ambiente. (2014). Guía para muestreos de suelos. <https://bit.ly/428KBB0>
- Muscolo, A., Panuccio, M. R., & Eshel, A. (2013). Ecophysiology of *Pennisetum clandestinum*: a valuable salt tolerant Grass. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 55-63. <https://doi.org/f43rmc>
- Pancorbo, S. A., & Ruiz, G. M. (2020). Revisión sistemática: Fitoestabilización de Cadmio para la recuperación de suelo [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63390>
- Pérez, J., Ruiz, A. A., Aramburú, V. S. (2020). Reducción de contaminantes del relave ácido de mina en planta concentradora de Jangas, Perú. *Avances*, 22(2), 208-221. <https://bit.ly/3LugEo4>
- Quezada, C., Sandoval, M., Ovalle, C., & Pérez, V. (2020). Influencia de cubiertas vegetales en la disponibilidad de agua y rendimiento en viñedos de secano. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 36(2), 140-150. <https://revistas.udec.cl/index.php/chjaas/article/view/2873>
- Quishpe, A., Barreto, P., & Guevara, A. (2021). Remoción de arsénico de efluentes líquidos de plantas de beneficio de oro y cuerpos hídricos, de la zona minera de Ponce Enriquez, por rizofiltración con pasto azul (*dactylis glomerata*). *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 41(2), 164-186. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7402020>
- Quispe, A. P., & Quispe, L. P. (2021). Fitorremediación con pastos asociados: *Dactylis glomerata* y medicago sativa para el mejoramiento de suelos contaminados con metales pesados en la zona exbanco minero – Ica, 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/92325>
- Romero, A., Medina, R., & Flores, S. (2012). Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 11(22), 13–16. <https://bit.ly/3pfueEE>
- Salas-Luévano, M. A., González-Rivera, M. L., Letechepía, C., Hernández-Dávila, V. M., & Vega-Carrillo, H. R. (2017). Estabilización de metales pesados en jales mediante vegetación endémica e introducida en fresnillo, Zacatecas. *Biología y Sustentabilidad*, 2(1), 5-10. <https://revistas.uaz.edu.mx/index.php/bioteconologiaysust/article/view/221>
- Servicios Analíticos Generales S.A.C. (2021). Laboratorio de Ensayos acreditado ISO/IEC 17025:2017 | Registro [INACAL] N-047 | Registro [IAS] TL-829 | Registro [IAS] TL-951. <https://www.sagperu.com/>
- Sharma, J., Kumar, K., & Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Silva, R. C. (2020). Capacidad de retención del agua disponible en suelos agrícolas de acuerdo a la textura y al contenido de materia orgánica, transecto Huaura-Mazo [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Repositorio Institucional UCSS. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/837>
- Simón, F. A., & Mayet, R. (2017). Sistema innovador de cultivos in vitro inoculados con simbiontes rizosférico MVA y bacterias surfactantes como fitoremediador de suelos contaminados con agrotóxicos. *INNOVA Research Journal*, 2(8.1), 174-193. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n8.1.2017.361>
- Terrones-Saeta, J. M., Suárez-Macías, J., Bernardo-Sánchez, A., Álvarez de Prado, L., Menéndez Fernández, M., Corpas-Iglesias, F. A. (2021). Treatment of Soil Contaminated by Mining Activities to Prevent Contamination by Encapsulation in Ceramic Construction Materials. *Materials*, 14, 6740. <https://doi.org/10.3390/ma14226740>
- Torre, P. A., Hurtado, L. L., Dextre, J. E., Porles, L. F., Rujel, V. E., Medina, A., Fretel, K., Reyna, J. L., & Huiman, A. (2022). Alternativas de sustitución y reducción del uso de mercurio en la minería artesanal de Madre de Dios. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 25(50), 281–287. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24272>
- Visconti, D., Álvarez-Robles, M. J., Massimo, N. F., Clemente, R. (2020). Use of *Brassica juncea* and *Dactylis glomerata* for the phytostabilization of mine soils amended with compost or biochar. *Chemosphere*, 260, Artículo 127661. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127661>
- Zhu, H., Gao, Y., & Li, D. (2019). Germination and growth of grass species in soil contaminated by drill cuttings. *Western North American Naturalist*, 79(1), 49-55. <https://bit.ly/42rgwFX>

Contribución de autoría:

Conceptualización: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Curación de datos: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Análisis formal: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Adquisición de fondos: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Investigación: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Metodología: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Administración del proyecto: Recursos: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Software: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Supervisión: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Validación: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Visualización: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Redacción - borrador original: Janeth Yvonne Vizconde Suárez, Redacción - revisión y edición: Janeth Yvonne Vizconde Suárez

Conflictos de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses