

Eficiencia fitorremediadora de vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) en agua contaminada con arsénico y plomo

Phytoremediator efficiency of vetiver (Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty) in water contaminated with arsenic and lead

Vitelio Goykovic-Cortés^{1*}, Sandra Ugalde-Smolcz¹, Patricia Pacheco-Cartagena²

RESUMEN

En los últimos años, la fitorremediación se ha convertido en una tecnología emergente debido a su bajo costo y sustentabilidad. El propósito de esta investigación fue evaluar la capacidad fitorremediadora de vetiver en agua contaminada con arsénico (5 mg L^{-1}) y plomo (10 mg L^{-1}). Para esto se utilizó agua potable como matriz ya que representa una especial vulnerabilidad y riesgo de contaminarse por estos compuestos en algunas localidades del extremo norte de Chile, principalmente las rurales. El agua de los tratamientos con y sin vetiver fue evaluada a los 0, 5, 10 y 15 días de iniciada la experimentación, mientras que las concentraciones de arsénico y plomo en el tejido vegetal (raíz y parte aérea) se realizaron a los días 0 y 15. Los resultados indicaron que las raíces de vetiver acumularon la mayor concentración de ambos elementos en relación con la parte aérea, 5% más de As y 10% más de Pb. El factor de traslocación menor de 1 demostró la capacidad fitoestabilizadora de vetiver, mientras que el factor de bioacumulación mayor de 1 evidenció su potencial como acumuladora. La eficiencia de remediación de la matriz contaminada llegó al 100% para Pb y 99,1% para As. Esto nos permite concluir que vetiver es una planta altamente eficiente para la descontaminación de agua contaminada con As y Pb bajo las condiciones naturales de esta zona.

Palabras clave: vetiver, descontaminación de agua, eficiencia de remediación, fitoestabilización, fitoextracción.

ABSTRACT

In recent years, phytoremediation has become an emerging technology due to its low cost and sustainability. The purpose of this research was to evaluate the phytoremediation capacity of vetiver in water contaminated with arsenic (5 mg L^{-1}) and lead (10 mg L^{-1}). For this, drinking water was used as a matrix since it represents a special vulnerability and risk of being contaminated by these compounds in some localities in the extreme north of Chile, especially rural ones. The water from the treatments with and without vetiver was evaluated at 0, 5, 10 and 15 days after starting the experimentation, while the concentrations of arsenic and lead in the plant tissue (root and aerial part) were carried out on day 0 and 15. The results indicated that vetiver roots accumulated the highest concentration of both elements in relation to the aerial part, 5% more As and 10% more Pb. The translocation factor less than 1 demonstrated the phytostabilizing capacity of vetiver while the bioaccumulation factor greater than 1 demonstrated its potential as an accumulator. The remediation efficiency of the contaminated matrix reached 100% for Pb and 99.1% for As. This allows us to conclude that vetiver is a highly efficient plant for the decontamination of water contaminated with As and Pb under the natural conditions of this area.

Keywords: vetiver grass, water decontamination, efficiency of remediation, phytostabilization, phytoextraction.

Introducción

En algunas zonas del extremo norte de Chile la presencia de arsénico y algunos metales pesados como el plomo es un problema importante. En ocasiones, concentraciones naturalmente altas de arsénico se asocian con depósitos ricos en cobre, los cuales se han explotado durante décadas. También en el norte del país

este metaloide se encuentra en precipitados salinos, en rocas volcánicas y aguas termales. El arsénico se consideró por primera vez como un problema de salud significativo para los habitantes de la capital de la región de Antofagasta debido a la exposición crónica, entre 1958 y 1970 (Tapia *et al.*, 2019).

La exposición a bajas o altas concentraciones de arsénico, ya sea debido al consumo directo de agua

¹ Universidad de Tarapacá, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Agrícola. Chile. Arica, Chile.

² Universidad de Tarapacá, Facultad de Ciencias Agronómicas, Laboratorio de Suelos y Agua. Arica, Chile.

* Autor por correspondencia: vgoykovi@uta.cl.

potable contaminada o indirectamente a través de la ingesta diaria de alimentos contaminados, puede ser fatal para la salud humana (Singh *et al.*, 2015).

Los efectos de la exposición humana al arsénico conducen a enfermedades como cánceres, lesiones cutáneas, diabetes e hipertensión. El arsénico es un potente agente genotóxico para animales y humanos que puede dañar el ADN, induce aberraciones cromosómicas, intercambio de cromátidas hermanas y formaciones de micronúcleos (Mitra *et al.*, 2020).

En la región de Arica y Parinacota se ha registrado la presencia de elementos tóxicos como arsénico, plomo y manganeso, tanto en el agua potable como en aguas superficiales y freáticas (Tchernitchin *et al.*, 2015). Los ríos San José y Lluta que riegan los valles costeros de la región presentan $0,04 \text{ mg L}^{-1}$ y $0,487 \text{ mg L}^{-1}$ de arsénico respectivamente (INIA, 2016), mientras que en el río Camarones, también de esta región, los niveles de arsénico son de aproximadamente 10 mg/L , lo que supera con creces el valor establecido como seguro por la Organización Mundial de la Salud ($0,01 \text{ mg/L}$). (Apata *et al.*, 2017).

La descontaminación de matrices contaminadas se realiza generalmente con tratamientos *ex situ*. Estos son extremadamente caros y a veces poco prácticos. Como resultado, en los últimos veinte años, la fitorremediación se ha convertido en una tecnología emergente para la revegetación de suelos contaminados (Yan *et al.*, 2020) debido a su bajo costo y su alta sustentabilidad, la que además aporta un valor recreativo y estético al paisaje al permitir la expresión vegetal en cuerpos de agua y suelos contaminados. Por su alta eficiencia en el tratamiento de químicos orgánicos e inorgánicos el vetiver puede emplearse para remediar en términos rentables las aguas residuales. En algunas oportunidades se emplea esta especie como sistema flotante de la isla Vetiver (FVI) como una tecnología relativamente nueva de tratamiento de humedales artificiales. Esta especie vegetal tolera una amplia gama de pH (3,5-11,5), salinidad, metaloides y metales pesados como arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, níquel, selenio y zinc. También es capaz de absorber gran cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio, y por su extenso y profundo sistema de raíces podría reducir o eliminar la lixiviación de nitratos al agua subterránea (Darajeh *et al.*, 2019).

Se ha comprobado que el vetiver tiene mayor capacidad fitorremediadora en aguas residuales

contaminadas que otras especies de plantas como varias especies de *Cyperus*, especies de *Phragmites* y especies de *Typha* (Darajeh *et al.*, 2019). También a nivel de plántulas desarrolladas *in vitro* vetiver tiene el potencial de remediar y tolerar niveles variables de As (Singh *et al.*, 2017).

El grado de biodisponibilidad de los metales como Ag, Al, Cd, Cu, Co, Ni, Pb y Zn es usualmente un factor limitante para inducir una respuesta del organismo. Las limitaciones en la biodisponibilidad se atribuyen, entre otros factores, al pH del medio y la presencia de sustancias químicas que compiten por los sitios de unión (como calcio, sodio o magnesio). (Adams *et al.*, 2020).

Para la mayoría de los metales pesados, sus concentraciones disminuyen al aumentar el pH. Sin embargo, el plomo muestra una tendencia ascendente al incrementarse el pH (Król *et al.*, 2020). La dureza del agua también puede resultar en la precipitación de algunos metales tóxicos, reduciendo su biodisponibilidad. Así, una baja dureza del agua disminuye la precipitación de los metales favoreciendo su biodisponibilidad.

El objetivo de este estudio fue abordar la capacidad fitorremediadora de vetiver en dos compuestos con biodisponibilidad opuesta –arsénico y plomo– de forma conjunta, bajo las condiciones del agua potable y clima presentes en esta región desértica.

Método y materiales

Diseño experimental

Para valorar la capacidad fitorremediadora de vetiver se utilizaron plantas de tres meses de edad cultivadas en maceta. Las plantas se lavaron con agua potable y se pusieron flotando en una plancha de poliestireno expandido de 5 cm de espesor, cubriendo totalmente la superficie de los estanques de plástico ($40 \times 20 \times 20 \text{ cm}$), a razón de una planta por estanque. Cada réplica consistió en una planta de vetiver de biomasa similar 300 g ($\pm 15 \text{ g}$), raíces de 30 cm ($\pm 1,5 \text{ cm}$), 6 hijuelos y 40 cm ($\pm 2 \text{ cm}$) de altura.

Los estanques se llenaron con agua potable y se dejó que las plantas se aclimataran durante 30 días. En este periodo se fertilizaron con una dosis de 1 ml de ácido húmico y el agua se cambió cada siete días. Una vez aclimatadas se cambió el agua de los estanques y se inocularon con plomo y arsénico. Los tratamientos consistieron en agua

contaminada sin vetiver (SV) y agua contaminada con vetiver (CV) con las siguientes concentraciones: 10 mg L⁻¹ de Pb y 5 mg L⁻¹ de As. Para inocular se utilizó Pb (NO₃)₂ y As₂O₃ de 1000 ppm. Se aplicaron concentraciones que estuviesen muy por encima de las normas chilenas para agua potable, NCh 409/1.Of. 2005, y agua para diferentes usos, NCh 1333.Of. 78 y por encima de los niveles de arsénico ya encontrados en los ríos.

Procesamiento de las muestras

Inmediatamente después de llegar al laboratorio las muestras de agua se filtraron por un filtro de 0,45 micrones y se conservaron sin acidificar a 4 °C desde su recolección. Las concentraciones de plomo se determinaron por espectrometría de absorción atómica, mientras que el arsénico se midió por espectrometría de absorción atómica con generación de hidruro, ambas en un equipo Varian 220. La curva se estableció entre 1 y 20 ppm. Los métodos empleados son los sugeridos por el manual Métodos Normalizados para el Análisis de Agua Potable y Residuales (APHA, 1992).

Preparación de las muestras de tejido vegetal

Una vez que se recolectó la muestra se lavó para eliminar las impurezas. El tejido vegetal (raíz y hoja) se secó a 60 °C en estufa por un período de 48 horas. La muestra seca se molió en molinillo y tamizó por malla de 2 mm.

Luego se procedió a la obtención de las cenizas. Un gramo de la muestra se llevó a mufla a una temperatura de 550 °C, por un período de 4 horas. Posteriormente se disolvieron en HCl 2N y se aforó a 50 mL. La determinación se realizó en la solución de las cenizas utilizando espectrofotometría de absorción atómica en equipo Varian 220. Los métodos empleados para el análisis de tejidos vegetales son los sugeridos por INIA, 2007.

Para determinar la capacidad de acumulación de metales pesados de la planta se calcularon: (a) BCF, que corresponde a la relación entre la concentración de metales en la raíz de la planta respecto a la concentración de metales en la matriz (Ghosh *et al.*, 2015); (b) el factor de traslocación (TF) de la planta que corresponde al cociente entre la concentración del metal en la parte aérea y raíz (Mirza *et al.*, 2017), y (c) la eficiencia de fitorremediación (EF) según las siguientes fórmulas:

$$BCF = \frac{[\text{metal}^*]_{\text{raíz}}}{[\text{metal}^{**}]_{\text{agua}}}$$

$$TF = \frac{[\text{metal}^*]_{\text{hojas}}}{[\text{metal}^*]_{\text{raíz}}}$$

*Las concentraciones se expresan en mg kg⁻¹ de materia seca para materia vegetal. ** La densidad del efluente es 1 por lo que se expresa en mg kg⁻¹. (EF)= 100-[Metal en el agua]_{final}*100/ [Metal en el agua]_{inicial}.

Diseño experimental

Se utilizó el diseño experimental completamente al azar con estructura factorial 2x4 (dos niveles factor A: con y sin vetiver, y cuatro niveles del factor B: días de remediación) con 6 repeticiones totalizando 48 unidades experimentales.

Para el análisis de datos se usó el análisis de varianza La prueba estadística correspondió a la prueba de F a un nivel de significación α 0,05. Para la comparación de promedios se utilizó la prueba de Duncan al 5%. El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa Info Stat versión 2016 I.

Resultados

Eficiencia de vetiver en la remediación de As y Pb

El uso de vetiver en el agua contaminada con As (Figura 1) mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

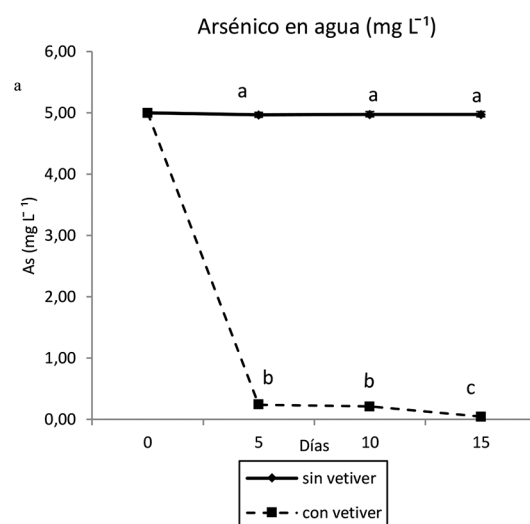


Figura 1. Concentración de arsénico en agua (mg L⁻¹) con aplicación de pasto vetiver en diferentes periodos de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias $p \leq 0,05$ (n = 6).

entre los tratamientos con vetiver (CV) y el testigo sin vetiver (SV), manteniéndose hasta el fin del ensayo, donde al día 15 la concentración en CV fue de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ y SV $4,87 \text{ mg L}^{-1}$. La concentración de arsénico CV disminuyó significativamente, de 5 mg L^{-1} a $0,24 \text{ mg L}^{-1}$ al día 5, manteniéndose sin diferencias hasta el décimo día. Sin embargo, entre los días 10 y 15 la concentración disminuyó en términos significativos, alcanzando un valor final de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$. La concentración SV registró diferencias significativas entre los días 0 y 10 (5 mg L^{-1} a $4,98 \text{ mg L}^{-1}$), respectivamente, las cuales no variaron al día 15 ($4,98 \text{ mg L}^{-1}$).

En el caso de la concentración de plomo, CV mostró diferencias significativas respecto a SV, (Figura 2). Al cabo de 15 días la concentración CV no fue detectable, mientras que SV presentó $9,98 \text{ mg L}^{-1}$. Al igual que con el arsénico, la concentración de plomo disminuyó significativamente al día 5 en CV (de 10 mg L^{-1} a $0,09 \text{ mg L}^{-1}$), manteniéndose sin diferencias significativas hasta el día 15. Respecto de la concentración SV, no se registraron diferencias significativas entre los días 0 (10 mg L^{-1}) y 15 ($9,98 \text{ mg L}^{-1}$).

Probablemente el pH ligeramente ácido de la solución (Tabla I) no fue un impedimento para la absorción de Pb (100%) dado que este ión, a diferencia de la mayoría de los metales pesados, incrementa su concentración al aumentar el pH (Król *et al.*, 2020). La alta dureza expresada

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del agua potable utilizada.

	Forma	mg/L
Ce mS/cm		1,65
pH		6,4
Calcio	Ca^{2+}	209,00
Magnesio	Mg^{2+}	20,50
Potasio	K^{+}	4,50
Sodio	Na^{+}	92,00
Cloruros	Cl^{-}	196,40
Sulfatos	SO_4^{2-}	298,00
Azufre	S	99,6
Nitratos	NO_3^{-}	38,00
Bicarbonatos	HCO_3^{-}	219,60
Carbonatos	CO_3	ND
Carbonato de calcio	CaCO_3	660
Fósforo	$\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$	26,52

como CaCO_3 presente en la solución empleada (660 mg/L) tampoco fue determinante para aumentar la precipitación del Pb y por ende la biodisponibilidad de este catión.

Los resultados obtenidos en Pb en este estudio difieren de los de Roongtanakiat *et al.* (2007), quienes trabajaron con vetiver en un efluente industrial de fábrica de baterías con pH 1,35 y 11 mg L^{-1} de Pb, y encontraron una eficiencia de remediación menor del 5%, a diferencia del 100% de eficiencia que se observó en la investigación. Esta diferencia puede atribuirse al pH pues un pH tan bajo disminuye la concentración de plomo (Król *et al.*, 2019), de modo que no se encuentra biodisponible para el vegetal.

Sin embargo, la alta eficiencia de remediación de As 99,1% (Tabla II) difiere de los resultados reportados por Mirza *et al.* (2017) utilizando vetiver en medio hidropónico, donde obtuvieron un 53% de eficiencia con 10 mg L^{-1} de As y Sb conjuntamente. Esta diferencia podría atribuirse a la concentración natural de azufre de $99,6 \text{ mg L}^{-1}$ presente en el agua potable de este ensayo (Tabla I). Chen *et al.* (2017) consideran que el azufre influye tanto en la desintoxicación como en la traslocación, posiblemente por la estimulación de la síntesis de tiol y complejación de arsenito-fitoquelantes. Trabajando con *Vallisneria natans*, estos autores encontraron que con 20 mg kg^{-1} de azufre adicionado al efluente era suficiente para aumentar la capacidad de acumulación de arsénico casi tres veces más en comparación con el testigo.

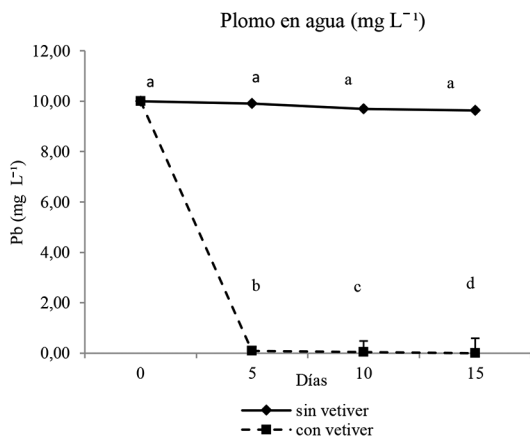


Figura 2. Concentración de plomo en agua (mg L^{-1}) con aplicación de pasto vetiver en diferentes periodos de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias $p \leq 0,05$ ($n = 6$).

Tabla 2. Eficiencia de remediación.

	Con Vetiver			Sin Vetiver		
	Inicial	Final	% de remediación	Inicial	Final	% de remediación
Arsénico	5	0,05	99,0	5	4,98	0,4
Plomo	10	0	100	10	9,98	0,2

* Remoción a los 15 días.

En otra investigación (He *et al.*, 2020) que apuntaba a la reducción simultánea de la biodisponibilidad de arsénico y cadmio en suelos agrícolas y su acumulación en *Brassica chinensis* L. mediante el uso de minerales, se observó que el As fue inmovilizado principalmente por calcio y magnesio a través de la formación de precipitados. Sin embargo, el contenido de Ca y Mg presente en el agua empleada en esta investigación no afectó la biodisponibilidad del arsénico.

Los resultados obtenidos en este trabajo, 99,1% de remediación, se asemejan a los reportados por Fonseca *et al.* (2020), quienes manifestaron que vetiver es una alternativa eficaz en la remoción del As tanto en cuerpos de agua como en sedimentos y suelos, dado que en el caso del agua con el sistema de islas flotantes registraron un 97% de remediación.

Concentración de As y Pb en hojas y raíz

Son pocas las plantas que tienen el potencial de ser hiperacumuladoras o acumuladoras de Pb (Ramos-Arcos *et al.*, 2021), y lo acumulan principalmente en las raíces. A nivel ultraestructural el Pb se acumula sobre todo en la pared celular, los espacios intercelulares y las vacuolas para evitar toxicidad (Phang *et al.*, 2010).

En vetiver los mecanismos de defensa empleados contra el estrés por metales incluyen: quelación de metales tóxicos por fenoles, glutatión, S-transferasa, tioles de bajo peso molecular y la secuestración y acumulación de metales en la pared celular (Melato *et al.*, 2016).

En cuanto al Pb en vetiver, el mecanismo más probable de desintoxicación es la síntesis de fitoquelantes y complejos Pb-fitoquelantes (Andra *et al.*, 2010). Se mencionan varias plantas con capacidad de extraer Pb como *Plantago major* (Romeh *et al.*, 2016). Sin embargo, solo vetiver y plantago han sido utilizadas en forma hidropónica con buenos resultados para bioacumular plomo.

Los análisis de tejido de vetiver revelan que solo el 24,1% de As y el 4,5% de Pb se acumularon en las hojas. Este resultado, respecto al Pb, es similar al reportado por Roongtanakiat *et al.*, (2007), donde vetiver presentó solo el 3,4% de Pb acumulado en las hojas.

La concentración de Pb y As en raíces fue mayor que en la parte aérea. Estos elementos no fueron transferidos a las hojas, como se observa en el TF <1, As 0,3 y Pb 0,05 (Tabla III). De acuerdo con Perales *et al.* (2020), un valor TF mayor de 1 indica una eficiente translocación del metal a brotes, por lo que la planta puede usarse con fines de fitoextracción. Si por el contrario, dicho valor es menor de 1, la translocación del metal es baja, por lo que este es retenido principalmente en las raíces pudiendo ser utilizado para fitoestabilización, por lo que vetiver actuó como fitoestabilizadora. Estos resultados coinciden con estudios previos de Gautam y Agrawal (2017), quienes al analizar el potencial de fitorremediación del vetiver para el tratamiento de agua contaminada con varios metales pesados, entre ellos el Pb, encontraron también que la concentración de este metal fue más alta en las raíces que en la parte aérea. En otros estudios efectuados en *Ambrosia ambrosioides* se detectó, al igual que en vetiver, que la planta no traslocó el Pb al follaje, mostrando un factor de traslocación (TF) inferior a uno en todos los tratamientos, los cuales consideraron una concentración de 0, 20, 40 y 60 mg L⁻¹ de Pb (Ramírez *et al.*, 2020).

Tabla 3. Factor de concentración biológico (BCF) y Factor de Traslocación (TF).

Tiempo (días)	Factor de concentración biológico (BCF)		Factor de Traslocación (TF)	
	Plomo	Arsénico	Plomo	Arsénico
Día 15	15,34	1,9	0,05	0,3

Una vez determinado que vetiver tiene valores de TF < 1, se evaluó la eficiencia de remoción con el factor de bioconcentración en raíces. Según Yanqun *et al.* (2005), valores de BCF > 1 indican una alta eficiencia para remover altos contenidos de metal, mientras que un BCF < 1 denota especies exclusoras. Los valores registrados en el tejido radical indican alta concentración de As y Pb, BCF > 1 (As 1,9 y Pb 15,34) (Tabla III). Al respecto, Bakshoodeh *et al.* (2016) obtuvieron resultados similares con vetiver, BCF 13,9, en un lixiviado de compost proveniente de sólidos de aguas servidas con 1,7 mg L⁻¹ de Pb. En cambio con As, Mirza *et al.* (2017) obtuvieron un BCF 10 en un experimento hidropónico utilizando vetiver.

Conclusión

El sistema radical masivo de vetiver y la abundante cantidad de pelos radicales junto con la presencia de azufre en el agua potable y el pH débilmente ácido favorecieron el alto porcentaje

de remediación de estos dos elementos con biodisponibilidad opuesta. Por otra parte, vetiver se comporta como fitoestabilizadora y muestra un alto potencial acumulador de As y Pb, lo cual es una ventaja, ya que este proceso reduce la movilidad de los metales y la lixiviación a las aguas subterráneas, además de disminuir la biodisponibilidad de estos elementos para la entrada en la cadena alimenticia.

Por lo tanto, vetiver demostró ser una opción eficaz para la remediación de agua con As y Pb bajo las condiciones naturales del agua potable presentes en la región. Estos resultados se pueden extrapolar a zonas rurales donde el acceso al agua potable es difícil.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Proyecto FIA PYT-2015-0252 “Validación del Sistema Vetiver en zonas áridas para la recuperación, remediación y protección de suelos agrícolas en la región de Arica y Parinacota”.

Literatura citada

- Adams, W.; Dwyer, R.; Mount, D.; Nordheim, E.; Rodríguez, P.H.; Spry D.
2020. Bioavailability Assessment of Metals in Freshwater Environments: A Historical Review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39(1): 48-59.
- Andra, S. S.; Datta, R.; Sarkar, D.; Makris, K. C.; Mullens, C. P.; Sahi, S. V.; Bach, S.B.H.
2010. Synthesis of phytochelatins in vetiver grass upon lead exposure in the presence of phosphorus. *Plant Soil*, 326: 171-185.
- Apata, M.; Arriaza, B.; Llop, E.; Moraga, M.
2017. Human adaptation to arsenic in Andean populations of the Atacama desert. *Am J Phys Anthropol.*, 2017; 1-8.
- APHA, AWWA, WPCF.
1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ed. Díaz de Santos, España. 1830 p.
- Bakshoodeh, R.; Alavi, N.; Mohammadi, A. M.; Ghanavati, H.
2016. Removing heavy metals from Isfahan composting leachate by horizontal subsurface flow constructed wetland. *Environ Sci Pollut*, 23: 12384-12391.
- Chen, G.; Feng, T.; Li, Z.; Chen, Z.; Chen, Y.; Wang, H.; Xiang, Y.
2017. Influence of Sulfur on the Arsenic Phytoremediation Using *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99: 411-414.
- Darajeh, N.; Truong, P.; Rezanian, S.; Alizadeh, H. and Leung D.W.M.
2019. Effectiveness of Vetiver Grass versus other Plants for Phytoremediation of Contaminated Water. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 7(3): 485-500.
- Fonseca Largo, K.M.; Ruiz Depablos, J.L.; Espitia-Sarmiento, E.F.; Llugsha Moreta, N.M.
2020. Artificial Floating Island with *Vetiver* for Treatment of Arsenic-Contaminated Water: A Real Scale Study in High-Andean Reservoir. *Water*, 12(11): 3086. <https://doi.org/10.3390/w12113086>.
- Gautam M. and Agrawal M.
2017. Phytoremediation of metals using vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) grown under different levels of red mud in sludge amended soil. *J. Geochem. Explor.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.03.003>.
- Ghosh, M.; Paul, J.; Jana, A.; De A.; Mukherjee, A.
2015. Use of the grass, *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification and phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants. *Ecol Eng.*, 74: 258-265.
- He, Y.; Lin, H.; Jin, X.; Dong, Y.; Luo, M.
2020. Simultaneous reduction of arsenic and cadmium bioavailability in agriculture soil and their accumulation in *Brassica chinensis* L. by using minerals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 198 (2020) 110660.
- INIA.
2007. Método de Análisis de Tejidos Vegetales. Centro Regional de Investigación. La Platina, Santiago, Chile. *Serie Actas INIA*, 40: 120.
- INIA.
2016. Elementos para la tecnificación del riego localizado en la Región de Arica y Parinacota. Boletín INIA N° 339. Santiago de Chile.
- Król, A.; Mizerna, K. and Bożym M.
2020. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 384 (2020) 12150.

- Melato, F.A.; Mokgalaka, N.S. and Mc Crindle, R.I.
2016. Adaptation and detoxification mechanisms of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) growing on gold mine tailings. *International Journal of Phytoremediation*, 18 (5): 509-520.
- Mirza, N.; Mubarak, H.; Chai, L.Y.; Yong, W.; Khan, M.J.; Khan, Q.U.; Hashmi, M.Z.; Farooq, U.; Sarwar, R.; Yang, Z.H.
2017. The Potential Use of *Vetiveria zizanioides* for the Phytoremediation of Antimony, Arsenic and Their Co-Contamination. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99: 511-517.
- Mitra, A.; Chatterjee, S.; Gupta, D.K.
2020. Environmental Arsenic Exposure and Human Health Risk. In: Fares A., Singh S. (eds) *Arsenic Water Resources Contamination. Advances in Water Security*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21258-2_5.
- Perales, L.A.; Del Socorro, Ma.S.D.; Gómez, Y.A.A.; Ramos, M.S.G. y Molphe, E.P.B.
2020. Análisis in vitro de la acumulación de metales pesados en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua. *Nova Scientia*. N° 24, 12(1): 1-22.
- Phang, I.C.; Leung, D.W.M.; Taylor, H.H.; Burritt, D.J.
2010. Correlation of growth inhibition with accumulation of Pb in cell wall and changes in response to oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant Growth Reg.*, 64: 17-25.
- Ramírez, R.I.G.; García, M.C.; Álvarez, V.d.P.; González, G.C.; Hernández, V.H.
2020. Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 10(7): 1529-1540.
- Ramos-Arcos, S.A.; González-Mondragón, E.G.; López-Hernández, E.S.; Rodríguez-Luna, A.R.; Morales-Bautista, C. M.; Lagunas-Rivera, S. and López-Martínez, S.
2021. Phytoremediation Potential of *Chrysopogon zizanioides* for Toxic Elements in Contaminated Matrices [Online First], IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.98235. Available from: <https://www.intechopen.com/online-first/76888>.
- Romeh, A.A.; Khamis, M.A. and Metwally, S.M.
2016. Potential of *Plantago major* L. for Phytoremediation of Lead-Contaminated Soil and Water. *Water Air Soil Pollut*, 227: 9.
- Roongtanakiat, N.; Tangruangkiat, S.; Meesat, R.
2007. Utilization of Vetiver Grass (*Vetiveria zizanioides*) for Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters. *Science Asia*, 33: 397-403.
- Singh, R.; Singh, S.; Parihar, P.; Singh, P.V. and Mohan, S.P.
2015. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112: 247-270.
- Singh, S.; Sounderajan, S.; Kumar, K. and Fulzele, D.P.
2017. Investigation of arsenic accumulation and biochemical response of in vitro developed *Vetiveria zizanioides* plants. *Ecotoxicol Environ Saf*, 145: 50-56.
- Tapia, J.; Rodríguez, M.P.; Castillo, P.; González, R.; Rodríguez, C.; Valdés, A.; Townley, B. and Fuentes, G.
2019. Chile: Environmental History, Perspectives and Challenges, Publisher: Nova Publishers, pp. 241-285.
- Tchernitchin, A.N.; Ríos, J.; Cortés, I. y Gaete, L.
2015. Polimetales en agua de Arica-Parinacota. Posibles orígenes y efectos en salud. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena. pp. 296-299.
- Yan, A.; Wang, Y.; Ngim, S.T.; Lokman, M.M.Y.; Ghosh, S. and Chen, Z.
2020. Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Front. Plant Sci.*, 11:359. doi: 10.3389/fpls.2020.00359.
- Yanqun, Z.; Yuan, L.; Jianjun, C.; Haiyan, C.; Li, Q. and Schwartz, C.
2005. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mine area in Yunnan, China. *Environmental Pollution*, 31: 755-762.

