

Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 4 (2): 19 - 36, Diciembre 2019. ISSN 2519-5352

BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN TEJIDOS DE VEGETACIÓN ACUÁTICA Y TERRESTRE EVALUADOS EN ÁREAS DONDE EXISTEN PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN EL PERÚ

Lizardo Cahuana¹; Osvaldo Aduvire^{2,3},

¹Ingeniero Agrónomo. Consultor del Área de Medio Ambiente y Planes de Cierre de Minas, SRK Consulting Peru S.A.

²Doctor Ingeniero de Minas. Consultor Principal de Área de medio Ambiente y Planes de Cierre de Minas, SRK Consulting Peru S.A. oaduvire@yahoo.es

³Profesor de la Sección Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

RESUMEN

Considerando que son pasivos ambientales mineros aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por antiguas operaciones mineras abandonadas que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. Por tanto, constituyen una de las principales fuentes de contaminación por elementos tóxicos, entre ellos, la movilización de carga metálica en los drenajes ácidos producidos por la oxidación de sulfuros. Estas descargas con aportes de metales pesados representan un riesgo potencial de acumulación en los tejidos de las especies vegetales circundantes en zonas de emplazamiento de pasivos ambientales mineros.

El presente trabajo se centra en evaluar la Bioacumulación de metales pesados en los tejidos de la vegetación acuática (macrófitas), principalmente en especies como: *Anomobryum prostratum*, *Marchantia Polymorpha* L. y *Bryofita sp.*, y vegetación terrestre en especies como: *Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* y *Cortaderia sp.*, en áreas circundantes a antiguas instalaciones mineras abandonadas.

Las actuaciones de remediación de Pasivos Ambientales Mineros en Perú, permite acometer estudios para evaluar el efecto de la bioacumulación de metales en especies macrófitas inducidas por las distintas concentraciones de metales pesados presentes en la columna de agua, en el caso de la vegetación terrestre se evalúa el efecto bioacumulador de éstas por efecto de los metales presentes en el suelo.

Palabras Clave: Bioacumulación - Metales pesados – PAM

BIOACUMULATION OF HEAVY METALS IN TISSUE OF AQUATIC AND TERRESTRIAL VEGETATION EVALUATED IN AREAS WHERE MINING ENVIRONMENTAL LIABILITIES EXIST IN PERU

Abstract

Considering that mining facilities are effluents, effluents, emissions, remains or deposits of waste produced by old abandoned mining operations that constitute a permanent and potential risk to the health of the population, the surrounding ecosystem and property. Therefore, they constitute one of the main sources of contamination by toxic elements, among them, the mobilization of metal cargo in the acid drains produced by the oxidation of sulphides. These discharges with heavy metal contributions represent a potential risk of accumulation in the tissues of the surrounding plant species in areas where mining environmental liabilities are located.

The present work focuses on evaluating the bioaccumulation of heavy metals in the tissues of aquatic vegetation (macrophytes), mainly in species such as: *Anomobryum prostratum*, *Marchantia Polymorpha* L. and *Bryofita sp.*, and terrestrial vegetation in species such as: *Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* and *Cortaderia sp.*, in areas surrounding old abandoned mining facilities.

The remediation actions of Mining Environmental Liabilities in Peru, allows studies to evaluate the effect of bioaccumulation of metals in macrophyte species induced by the different concentrations of heavy metals present in the water column, in the case of terrestrial vegetation is evaluated their bioaccumulative effect due to the effect of metals present in the soil.

Keywords: Bioaccumulation - Heavy metals – PAM

1. INTRODUCCIÓN

Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker, 1981; Barceló et al., 2003). Muchas especies toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o translocación el paso hacia las hojas (estrategia de exclusión). Sin embargo, otras los absorben y acumulan activamente en su biomasa aérea (estrategia acumuladora), lo que requiere una fisiología altamente especializada (Baker, 1981).

Los Macrófitos constituyen formas macroscópicas de vegetación acuática, como: macroalgas, pteridofitas (musgos, helechos) adaptadas a la vida acuática y angiospermas, presentan adaptaciones a este tipo de vida tales como: cutícula fina, estomas no funcionales,

estructuras poco lignificadas. Las concentraciones naturales de metales en ecosistemas acuáticos dependen de su distribución, meteorización y lixiviación en el área a estudiar. La presencia de metales en los ambientes acuáticos es el resultado de la actividad natural, como la erosión de las rocas que contienen minerales, el polvo trasladado por el viento, la actividad volcánica, los incendios forestales no causados por el hombre y la evaporación del agua producida por los mismos vegetales; asimismo, la actividad humana en los centros urbanos e industrializados contribuyen de manera importante a la acumulación de los metales en los cuerpos de agua (Fernández-Leborans y Olalla 2000) con alto potencial de traslado a la vegetación.

Las especies vegetales, incluidos algunos cultivos, tienen la capacidad de acumular metales en sus tejidos. Las plantas capaces de absorber y acumular metales por sobre lo establecido como normal para otras especies en los mismos suelos se llaman hiperacumuladoras y se encuentran principalmente en los suelos que son ricos en metales por condiciones geoquímicas naturales o contaminación antropogénica. Las plantas hiperacumuladoras, generalmente, tienen poca biomasa debido a que ellas utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a las altas concentraciones de metal en sus tejidos (Kabata - Pendias, 2000). Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar y acumular nutrientes (Lasat, 2000); sin embargo, algunos metales y metaloides no esenciales para los vegetales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos.

En el presente trabajo se busca evaluar la probable Bioacumulación de metales pesados presentes en zonas de pasivos mineros por parte de la vegetación presente en ecosistemas acuáticos (macrófitas), así como de ambientes terrestres (plantas terrestres).

2. Metodología

2.1 Método de muestreo

El desarrollo del muestreo de Macrófitos se realizó en concordancia con lo dispuesto en el Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales, aprobado mediante Resolución Directoral N° 2254-2007-DIGESA/SA de Perú, así como en los Protocolos de muestreo y análisis para Macrófitos, publicado por el Ministerio de Medio Ambiente de España (2005).

La evaluación comprendió tramos de 100 m de longitud, en cada estación. La toma de muestras se realizó a partir de recorridos de la totalidad del ancho del río, en zigzag desde una orilla a la otra. Se recogieron los macrófitos anotándose su abundancia, considerando una escala de 1 a 5, así como el porcentaje de cobertura.

Se colectaron muestras de *Anomobryum prostratum*, *Marchantia Polymorpha* y *Bryofita sp.* puesto que fueron las únicas especies de macrófitas registrada en el área de estudio. La colecta comprendió muestras de 500 gramos cada una para al análisis de metales pesados en los Laboratorios acreditados de SGS, su conservación y traslado fue en coolers con gel refrigerado.

Tabla 1 Directrices para la cuantificación de Macrófitos

Escala	Abundancia de cada especie	Porcentaje de cobertura (%)
	Descriptor	Clase
1	Rara	Individuos aislados
2	Ocasional	1-10%
3	Frecuente	10-50%
4	Abundante	50-70%
5	Muy abundante	>70%



Fotografía 1 Muestreo Macrófitos (Estación MAC-03)

En el caso del muestreo de la vegetación terrestre, cuando se trabajó con hierbas pequeñas de menos de 50 cm de altura se recolectó la planta completa con la raíz, de la cual se eliminó el exceso de tierra. Cuando se trató de hierbas de mayor tamaño o arbustos pequeños se cortó la parte terminal del tallo. En este caso, se procedió a coleccionar muestras de la especie de mayor abundancia en la zona, principalmente de las



Fotografía 2 Muestreo de Tejido Vegetal

2.2 Muestreo en vegetación terrestre y macrófitas

Tabla 3 Unidades de evaluación de metales en tejido vegetal

	ESTACION DE MUESTREO	COORDENADAS UTM WGS84			DESCRIPCIÓN
		ESTE	NORTE	ALTURA	
Macrófitas	MAC-1	765368	9253934	3350	Quebrada Tres Ríos. Aguas arriba. De los Pasivos Ambientales Mineros, se observó un caudal bajo, agua de tipo transparente, sin turbidez.
	MAC-2	765778	9253814	3261	Quebrada Tres Ríos. Colindante a las zonas de cultivo, aguas arriba antes de la confluencia con la quebrada S/N 1.
	MAC-3	766096	9253769	3206	Quebrada S/N 1. Aguas abajo Quebrada Tres ríos. Considerado como zona de impacto ya recibiría cualquier alteración causado aguas arriba.
	MAC-4	766561	9253192	3153	A 400 metros, aguas abajo del Puente Hualgayoc considerado zona de impacto aguas abajo de la confluencia de la descarga de los efluentes de los Pasivos Ambientales Mineros. Presento escasa macrófitas fondo de tipo rocoso.
	MAC-5	766392	9253013	3205	Estación de muestreo ubicado aguas arriba Río Hualgayoc, en la confluencia con las aguas de descarga de los efluentes de los Pasivos Ambientales Mineros, relieve bastante accidentada, ladera de montaña pronunciada aproximadamente 30%, afloramiento rocoso.
Plantas	PT-1	765424	9253328	3494	Punto de evaluación ubicado en la parte alta del área de estudio sobre los 3517 msnm del área de

Familias Poaceae, La colecta comprendió muestras de 500 gramos para al análisis de metales en los Laboratorios acreditados de SGS su conservación y traslado fue en coolers con gel refrigerado. El procedimiento de muestreo se llevó a cabo siguiendo como base la Guía para la recolecta y preparación de muestras botánicas publicado por el Herbario Nacional del Museo Nacional de Costa Rica (2008).

La evaluación de metales en el tejido vegetal se llevó a cabo en 05 estaciones de macrófitas y 05 estaciones de vegetación terrestre, ubicados en la zona de los pasivos mineros en el distrito de Hualgayoc, en la provincia del mismo nombre y departamento de Cajamarca en el Peru.

La finalidad de evaluar macrófitas consiste en determinar el probable efecto bioacumulador de éstas frente a las distintas concentraciones de metales pesados presentes en la columna de agua. En el caso de la vegetación terrestre, se busca evaluar el efecto bioacumulador de éstas, frente a los metales presentes en el suelo. A continuación, se indica la ubicación de las 10 estaciones de evaluación de metales en tejido vegetal.

ESTACION DE MUESTREO	COORDENADAS UTM WGS84 Zona 17 S			DESCRIPCIÓN
	ESTE	NORTE	ALTURA	
				influencia directa de los pasivos ambientales 14471, 14474, 14469, 4157, 14469, 7289, 7304, entre otros. Presenta una superficie rocosa.
PT-2	765438	9283768	3354	Ubicado al lado intermedio del área de estudio ubicado aproximadamente entre los 3 300 msnm. Próximo a los pasivos ambientales 7300, 7303, 7305, 7209, 7310 presenta suelos drenados pendientes moderada terreno agrícola.
PT-3	765246	9263542	3500	Punto ubicado en la parte alta de la unidad de vegetación pajonal sobre los 3500 msnm próximo a los PAM, 14466, 7294, ubicado lado intermedio alto del área de estudio, la cobertura vegetal es abundante de porte mediano a alto, relieve terreno varía desde moderada a pronunciada.
PT-4	765989	9253332	3291	Punto ubicado en la parte alta de la unidad de vegetación pajonal sobre los 3500 msnm muy próximos a los pasivos minero, 14466,7294, ubicado lado intermedio alto del área de estudio, la cobertura vegetal es abundante de porte mediano a alto, relieve del terreno varía desde moderada a pronunciada.
PT-5	766318	9253260	3203	Punto se encuentra ubicado en la parte baja de la zona del proyecto presenta una geografía accidentada laderas muy pronunciadas, que limita con el cauce del Río Hualgayoc, se ubica cerca a los PAM 14465, 7312, 7302,7308 ,7311.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la escala de abundancia de Macrófitos

En la presente evaluación se registró únicamente a *Anomobryum prostratum*, *Marchantia Polymorpha* y *Bryofita sp.* son plantas acuáticas cuyo hábitat son las riberas de cursos de agua permanentes, vertientes, terrenos encharcados con afloramientos de agua.

La escala de abundancia de *Anomobryum prostratum* “musgo” fue “ocasional” escala (2) para las estaciones MAC-2 y MAC-5, para la estación MAC-3 fue la escala de abundancia “frecuente” (3); mientras que, en la estación MAC-4 la escala de abundancia de la especie *Bryofita sp.* fue “ocasional” escala (2), finalmente, con respecto a la estación MAC-1 se registró la especie *Marchantia Polymorpha L.* “musgo” que reflejó una escala de abundancia “ocasional” escala (2).

Tabla 2 Resultados de la escala de abundancia de Macrófitos

CLASE	Bryopsida	Bryopsida	Marchantiopsida	
ORDEN	Bryales	Bryales	Marchantiales	
FAMILIA	Bryaceae	Bryaceae	Marchantiaceae	
ESPECIE	<i>Bryofita sp.</i>	<i>Anomobryum prostratum</i>	<i>Marchantia Polymorpha</i> L.	
REGISTRADO (ESTACIÓN)	MAC-4	MAC-2, MAC-3 y MAC-5	MAC-1	
MAC-1	% Cobertura Cauce	-	-	1
	% Cobertura Orilla	-	-	3
	Escala de Abundancia	-	-	2
MAC-2	% Cobertura Cauce	-	2	-
	% Cobertura Orilla	-	5	-
	Escala de Abundancia	-	2	-
MAC-3	% Cobertura Cauce	-	1	-
	% Cobertura Orilla	-	4	-
	Escala de Abundancia	-	3	-
MAC-4	% Cobertura Cauce	1	-	-
	% Cobertura Orilla	5	-	-
	Escala de Abundancia	2	-	-
MAC-5	% Cobertura Cauce	-	1	-
	% Cobertura Orilla	-	5	-
	Escala de Abundancia	-	2	-

3.2 Resultados de la concentración de metales pesados en Macrófitos

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de metales pesados en el tejido de la vegetación acuática de las especies

Anomobryum prostratum, *Marchantia Polymorpha* L. y *Bryofita sp.* según el Informe de Ensayo N° AG1622656/SGS (Método SGS-PO-ME-101:2016, Determinación de metales en muestras orgánicas por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente – ICP-MS).

Tabla 4 Concentración de metales (mg/Kg) en el tejido vegetal acuático

Bioacumulación de Metales pesados en Macrófitos			09:00:00	12:20:00	13:30:00	11:40:00	12:20:00
Parámetro	Unidad	LD	Tejido Vegetal MAC-01	Tejido Vegetal MAC-02	Tejido Vegetal MAC-03	Tejido Vegetal MAC-04	Tejido Vegetal MAC-05
Mercurio (Hg)	mg/kg	0.05	ND	0.2	< 0.10	2.2	--
Arsénico (As)	mg/kg	0.05	3.3	6.9	2.7	9.7	--
Cadmio (Cd)	mg/kg	0.05	0.2	4.1	2.9	< 0.10	--
Cobre (Cu)	mg/kg	0.05	2.3	3.8	85	15	--
Cromo (Cr)	mg/kg	0.05	5.2	5.5	1.8	1.2	--
Estaño (Sn)	mg/kg	0.05	0.1	0.2	0.2	0.4	--
Manganeso (Mn)	mg/kg	0.05	>166.67	>166.67	>166.67	44	--
Níquel (Ni)	mg/kg	0.05	1.9	3.8	2.1	0.3	--
Plomo (Pb)	mg/kg	0.05	5.8	19	58	64	--
Selenio (Se)	mg/kg	0.05	ND	ND	0.1	ND	--
Zinc (Zn)	mg/kg	0.05	17	>166.67	>166.67	32	--

De los resultados de la Tabla 4 se puede concluir con respecto a las Macrófitas, que los siguientes elementos se encuentran ausentes o en concentraciones trazas en el tejido vegetal:

- Mercurio (Hg) ausente y no detectables en el caso de las estaciones MAC-01 y MAC - 05, mientras que en la estación MAC-02, MAC-03 y MAC-04 presenta valores por encima del Límite de Detección (LD). Del método analítico empleado por el laboratorio.

- Cadmio (Cd) con valores trazas o ausente en la estación MAC-05.

- Selenio (Se) no detectable en las estaciones MAC-01, MAC-02, MAC- 04 y MAC-05 mientras la estación MAC-03 con valor de 0.1 mg/kg, todos los demás parámetros por encima del límite de detección.

A continuación, se muestra el coeficiente de regresión Lineal Simple de la concentración de metales en tejido vegetal en Macrófitas y la concentración de metales en sedimento acuático:

Tabla 4 Coeficiente de regresión lineal macrófitas – sedimentos acuáticos

ELEMENTO	R ²
Mercurio	75.02
Arsénico	57.42
Cadmio	72,19
Cobre	63,64
Cromo	51.06
Plomo	38.59
Zinc	89.74

De acuerdo a los resultados se tiene que existe una relación lineal y estadísticamente significativa entre las concentraciones de Zinc (Zn) de los sedimentos y las macrófitas ($R^2=89.74\%$), por cuanto una mayor concentración de Zinc en sedimentos traerá consigo una mayor concentración de Zinc en el tejido vegetal, cabe mencionar que se registraron altas concentraciones de Zinc en sedimentos para todas las estaciones de monitoreo mayores a 500 mg/kg. El segundo elemento con mayor R^2 fue el Mercurio con 75.02 %, el mercurio muy usado en las labores mineras. Le sigue el Cadmio (Cd) con $R^2=72.19\%$, Cobre (Cu) con $R^2=63,64\%$, Arsénico (As) con $R^2=57,42\%$, Cromo (Cr) con $R^2=51.06\%$ y finalmente Plomo (Pb) con $R^2=38.59\%$.

El resto de los elementos no presentaron regresiones estadísticamente significativas que indiquen la existencia de relaciones entre las concentraciones de metales de ambas muestras (sedimentos y vegetación).

Los resultados anteriormente expuestos demostrarían que los metales de mayor disponibilidad para la vegetación acuática (macrófitas) son Zinc, Cadmio y Mercurio, los cuales serían bioacumulados en el tejido vegetal de las Macrófitas presentes en la zona de estudio. Sin embargo, es importante indicar que se debe tomar los resultados como una referencia puesto que no existen estudios preliminares que demuestren el poder bioacumulativo de dichas especies.

3.3 Resultados de la concentración de metales pesados en plantas terrestres

La finalidad de evaluar vegetación terrestre es buscar evaluar el efecto bioacumulador de éstas frente a los metales presentes en el suelo.

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de metales pesados en el tejido de la vegetación terrestre de las especies *Stipa mucronate*, *Festuca dolichophylla* “iru ichu” y *Cortaderia sp.* según el Informe de Ensayo N° AG1622656 realizados por SGS del Perú S.A.C.

Tabla 5 Concentración de metales (mg/kg) en el tejido vegetal terrestre

Bioacumulación de Metales pesados en Plantas Terrestre			09:00:00	12:20:00	13:30:00	11:40:00	12:20:00
			Tejido Vegetal				
Parámetro	Unidad	LD	PT-01	PT-02	PT-03	PT-04	PT-05
Mercurio (Hg)	mg/kg	0.05	ND	0.1	<0.10	ND	0.1
Arsénico (As)	mg/kg	0.05	0.6	6.5	0.8	0.3	7.5
Cadmio (Cd)	mg/kg	0.05	0.2	0.1	0.7	0.5	0.6
Cobre (Cu)	mg/kg	0.05	2.3	6.5	1.6	1.9	18
Cromo (Cr)	mg/kg	0.05	3.8	3	1.1	1.2	3.5
Estaño (Sn)	mg/kg	0.05	0.1	0.3	<0.10	ND	0.4
Manganeso (Mn)	mg/kg	0.05	104	>166.67	48	116	>166.67
Níquel (Ni)	mg/kg	0.05	1.5	1.1	0.6	0.6	2
Plomo (Pb)	mg/kg	0.05	7.5	27	22	5.2	53
Selenio (Se)	mg/kg	0.05	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc (Zn)	mg/kg	0.05	31	19	71	48	78

De los resultados se puede concluir que los siguientes elementos se encuentran ausentes en el tejido vegetal de las plantas terrestres evaluadas: Mercurio (Hg), ausente y no detectables, solo en las estaciones PT-01, PT-03 y PT-04 mientras que en la estación PT-02 y PT-05 registro valores de 0.1 mg/kg. Por otro lado, Estaño (Sn), ausente en las estaciones PT-03, PT-04 y presente con valores por encima de límite de detección en las estaciones PT-01, PT-02 y PT-05.

Las concentraciones del selenio (Se) en muestras de tejido vegetal obtenidas en la totalidad de las estaciones de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros arrojan valores

traza o no detectable (ND) en todas las estaciones de evaluación. Todos los demás parámetros estaciones presentaron valores por encima del límite de detección.

Cabe precisar que la concentración media de mercurio (Hg) para los suelos del mundo, raramente excede 400 $\mu\text{g kg}^{-1}$, asociándose principalmente a suelos orgánicos, Suelos con valores de mercurio (Hg) superiores a 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ pueden considerarse contaminados.

A continuación, se muestra el coeficiente de regresión Lineal Simple de la concentración de metales en tejido vegetal en plantas terrestres y la concentración de metales en suelo:

Tabla 6 Coeficiente de regresión lineal plantas terrestres – suelo

ELEMENTO	R ²
Mercurio	85.49
Arsénico	26.14
Cadmio	36.57
Cromo	89.16
Plomo	0.93

De acuerdo a los resultados se tiene que existe una relación lineal y estadísticamente significativa entre las concentraciones de Cromo (Cr) de los suelos y las plantas terrestres ($R^2=89.16\%$), por cuanto una mayor

concentración de Cromo en suelos traerá consigo una mayor concentración de Cromo en el tejido vegetal de las plantas terrestres. El segundo elemento con mayor R^2 fue el Mercurio con 85.49 %, el mercurio muy usado en las labores mineras. Le sigue el Cadmio (Cd) con

$R^2=36.57\%$, Arsénico (As) con $R^2=26.14\%$, y finalmente Plomo (Pb) con $R^2=0.93\%$.

Cabe indicar que estos elementos se encuentran presentes en elevadas concentraciones en los sedimentos evaluados, de forma tal que se incrementa su disponibilidad y su capacidad de poder ser acumulados.

Finalmente, el resto de los elementos evaluados no presentaron regresiones estadísticamente significativas que indiquen la existencia de relaciones entre las concentraciones de metales de ambas muestras.

3.4 Criterios de comparación

Debido a que en Perú no se cuenta con estándares nacionales de calidad ambiental para metales en tejidos vegetales, que establezcan los valores

máximos permitidos de contaminantes en el entornos de pasivos mineros; por tal motivo, además de la Regresión Lineal para plantas terrestre se ha realizado comparaciones basadas en lo establecido por la Association of American Feed Control Officials (AAFCO, 1996), así como lo establecido por Unión Europea (1988) para 3 especies vegetales (PT-1: *Stipa mucronata*, PT-2: *Festuca dolichophylla* y PT-4: *Cortaderia* sp) el cual fija valores máximos para metales pesados en alimentación animal.

La AAFCO (1996) americana clasifica los metales en altamente tóxicos, tóxicos, moderadamente tóxicos y ligeramente tóxicos y da unos valores máximos recomendables (Tabla 7), y que son en general bastante elevados.

Tabla 7 Niveles máximos recomendables de metales pesados en alimentos animales (AAFCO, 1996)

Categoría	Metal	Nivel máximo (mg/kg)
Altamente tóxico	- Cadmio	10
	- Mercurio	
	- Selenio	
Tóxico	- Bario	40
	- Cobalto	
	- Cobre	
	- Plomo	
	- Molibdeno	
	- Tungsteno	
	- Vanadio	
Moderadamente toxico	- Antimonio	400
	- Arsénico	
	- Yodo	
	- Níquel	
Ligeramente tóxico	- Aluminio	1 000
	- Boro	
	- Bromo	
	- Bismuto	
	- Cromo	
	- Manganeso	
	- Zinc	

Y la unión europea existe una legislación que fija valores máximos para metales pesados en alimentación animal. En España está recogida en el Real Decreto 747/2001 de 29 de junio, y cuyos

valores resumidos para piensos completos se muestran en la Tabla 8. Para materias primas y piensos complementarios los valores varían ligeramente.

Tabla 8 Niveles máximos de metales pesados en piensos completos (Orden 11 octubre de 1988)

Metal	Contenido Máximo (mg/Kg)
Arsénico	2
Plomo	5
Flúor	100 - 350
Mercurio	0.1
Cadmio	0.5 – 1.0

Frente a esta situación se decidió realizar estas comparaciones usando el estándar de calidad internacional para especies consideradas como palatables para el ganado, por lo tanto, de las 5 estaciones de evaluación para plantas terrestre, 3 estaciones (PT-1, PT-2 y PT- 4) se registraron especies consideradas como palatables.

Por otro lado, se indican los resultados de las concentraciones de seis (6) metales pesados considerados tradicionalmente por sus efectos tóxicos en tejido vegetal: (selenio, arsénico, cadmio, cobre, plomo y mercurio), en muestras

obtenidas en las áreas de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, y comparar sus resultados con los límites máximo establecidos por la AAFCO (1996). Y la unión europea (1998).

3.5 Resultados de la evaluación

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de metales pesados en el tejido de la vegetación terrestre de las especies: *Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* “iruichu” y *Cortaderia sp.* Según el Informe de Ensayo N° AG1622656 realizados por SGS del Perú S.A.C.

Tabla 9 Concentración de metales (mg/kg) en el tejido vegetal terrestre.

Bioacumulación de Metales pesados en Plantas Terrestre			03/09/2016 09:00:00 Tejido Vegetal <i>Stipa mucronata</i> PT-01	03/09/2016 12:20:00 Tejido Vegetal <i>Festuca dolichophylla</i> PT-02	03/09/2016 11:40:00 Tejido Vegetal <i>Cortaderia sp.</i> PT-04
Parámetro	Unidad	LD			
Mercurio (Hg)	mg/kg	0.05	ND	0.1	ND
Arsénico (As)	mg/kg	0.05	0.6	6.5	0.3
Cadmio (Cd)	mg/kg	0.05	0.2	0.1	0.5
Cobre (Cu)	mg/kg	0.05	2.3	6.5	1.9
Cromo (Cr)	mg/kg	0.05	3.8	3	1.2
Manganeso (Mn)	mg/kg	0.05	104	>166.67	116
Níquel (Ni)	mg/kg	0.05	1.5	1.1	0.6
Plomo (Pb)	mg/kg	0.05	7.5	27	5.2
Selenio (Se)	mg/kg	0.05	ND	ND	ND
Zinc (Zn)	mg/kg	0.05	31	19	48

Arsénico (AS).

Las concentraciones del arsénico (As) en muestras de tejido vegetal obtenidas en algunas de las estaciones de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, arrojan valores de concentración superior a los establecidos en los límites de detección (LD=0.05) del método analítico empleado por el

laboratorio, tal como se observa en la Tabla 9, Sin embargo, estos valores se encuentran por debajo de la concentración máxima permitidas por la AAFCO (400 mg/kg).

Este resultado evidencia que las concentraciones de (As) encontradas en las especies palatables (*Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* y

Cortaderia sp) registrado en la estación (PT-1, PT-2 y PT-4) no constituye peligro ni riesgo tóxico para el ganado o especies silvestres locales al encontrarse estas concentraciones dentro de lo permitido por la AAFCO (1996). Sin embargo, estos valores comparados con la legislación de la Unión Europea (Real Decreto 747/2001. España) evidencian que las concentraciones de (As) encontradas en la estación PT-2 con (6.5 mg/kg)

se encuentran por encima del contenido máximo permitido (2 mg/kg) este incremento de concentración posiblemente se deba a la presencia de los Pasivos Ambientales Mineros con códigos (7300, 7303, 7305, 7209, 7310) sin embargo este valor es mucho menos que la concentración máxima de la AAFCO (400 mg/kg). Tal como se observa en la Tabla 9.

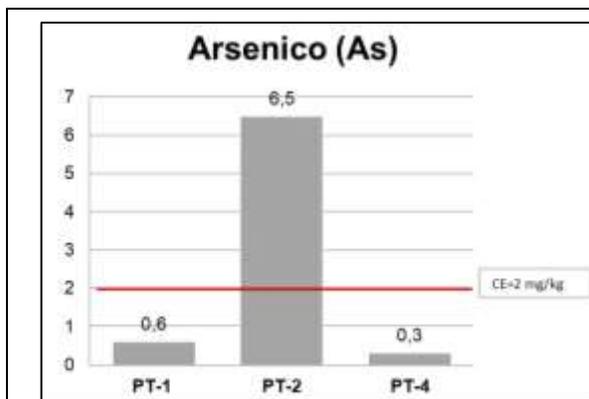


Figura 1 Concentración de Arsénico en las estaciones evaluadas

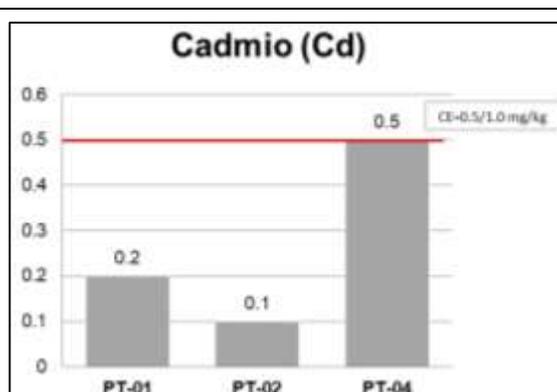


Figura 2 Concentración de Cadmio en las estaciones evaluadas

Cadmio (Cd)

Las concentraciones del cadmio (Cd) en muestras de tejido vegetal obtenidas en la totalidad de las estaciones de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, arrojan valores por debajo de las concentraciones máximas establecidas por la Unión Europea (0.5 a 1.5 mg/kg Real Decreto 747/2001. España), asimismo, obtuvieron valores por debajo de la concentración máxima establecidas, así como también para los límites máximos de la AAFCO (10 mg/kg) (1996), todas las estaciones estuvieron por debajo de la concentración máxima. Lo cual indicaría que las concentraciones de cadmio no ocasionarían efectos adversos biológicos a la biota terrestre. Tal como se observa en la siguiente figura.

Cobre (Cu)

Las concentraciones del Cobre (Cu) en muestras de tejido vegetal obtenidas en las estaciones (PT-

1, PT-2 y PT-4) de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, arrojan valores de concentración superior a los establecidos en los límites de detección (LD=0.05) del método analítico empleado por el laboratorio, tal como se observa en la Tabla 9. Sin embargo, estos valores se encuentran por debajo de la concentración máxima permitidas por la AAFCO (40 mg/kg),

Este resultado evidencia que las concentraciones de (Cu) encontradas en las especies palatables (*Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* y *Cortaderia sp*) registrado en la estación (PT-1, PT-2 y PT-4) no constituye peligro ni riesgo tóxico para el ganado o especies silvestres locales al encontrarse estas concentraciones muy por debajo de lo permitido por la AAFCO (1996). Sin embargo, la legislación de la Unión Europea (Real Decreto 747/2001. España) no establece límites máximos de concentración referidos a este metal.

Mercurio (Hg)

Las concentraciones del mercurio (Hg) en muestras de tejido vegetal obtenidas en la totalidad de las estaciones de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, arrojan valores por debajo de las

concentraciones máximas establecidas por la Unión Europea (0.1 mg/kg. Real Decreto 747/2001. España), así como los límites máximos de la AAFCO (10 mg/kg) (1996). Por lo tanto, estas concentraciones probablemente no ocasionarían efectos biológicos adversos a la biota terrestre. Ver figura siguiente:

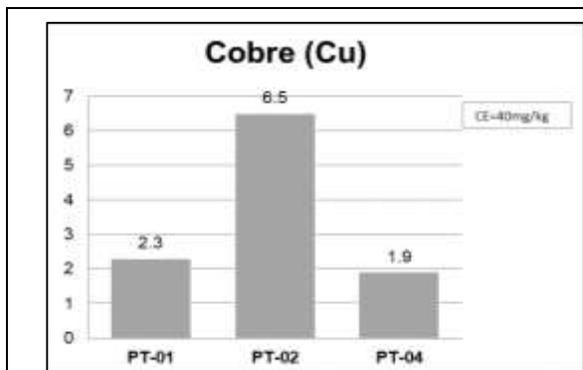


Figura 3 Concentración de Cobre en las estaciones evaluadas

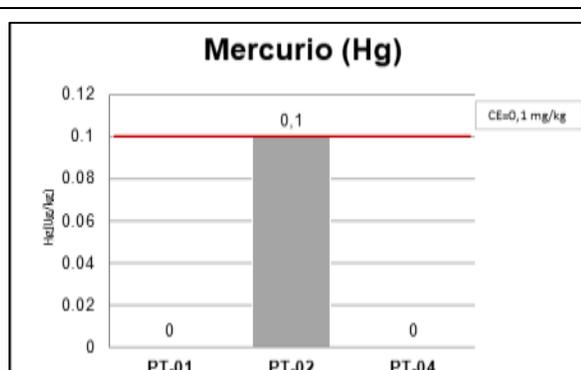


Figura 4 Concentración de Mercurio en las estaciones evaluadas

Plomo (Pb).

Al respecto las concentraciones de plomo (Pb) en muestras de tejido vegetal obtenidas en las estaciones de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, (PT-1, PT-2 y PT-4) arrojan valores por encima de las concentraciones máximas establecidas por la Unión Europea (5.0 mg/kg. Real Decreto 747/2001. España), se observa un incremento de concentración desde el punto PT-1 hacia el PT-2, en (7.5 a 27 mg/kg) esto posiblemente se deba a que el uso del suelo es de tipo minero y de acuerdo a las condiciones geológicas de la zona estarían conformados por rocas sedimentarias y rocas ígneas ácidas, que pueden contener Cu, Pb Zn y Ag, sin embargo esta concentración de plomo (Pb) vuelve a disminuir en el punto PT-4 donde finalmente la concentración de este parámetro alcanza a (5.2 mg/kg). Sin embargo, de las estaciones evaluadas ninguna estaría superando a los límites máximos que establece la AAFCO (40,0 mg/kg) (1996), Tal como se observa en la Tabla 7, es importante indicar estos valores son referenciales por lo que no podemos asegurar si existe efecto biológico adversos a la

biota terrestre en la zona por lo que se sugiere hacer seguimientos e investigación.

Zinc (Zn)

Las concentraciones del Zinc (Zn) en muestras de tejido vegetal obtenidas en las estaciones (PT-1, PT-2 y PT-4) de muestreo en el área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, arrojan valores de concentración superior a los establecidos en los límites de detección (LD=0.05) del método analítico empleado por el laboratorio, tal como se observa en la Tabla 9, Sin embargo, estos valores se encuentran por debajo de la concentración máxima permitidas por la AAFCO (1 000 mg/kg),

Este resultado evidencia que las concentraciones de (Zn) encontradas en las especies palatables (*Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* y *Cortaderia sp.*) registrado en la estación (PT-1, PT-2 y PT-4) no constituye peligro ni riesgo toxico para el ganado o especies silvestres locales al encontrarse estas concentraciones muy por debajo de lo permitido por la AAFCO (1996). Sin embargo, la legislación de la Unión Europea (Real Decreto 747/2001. España) no establece límites máximos de concentración referidos a este metal.

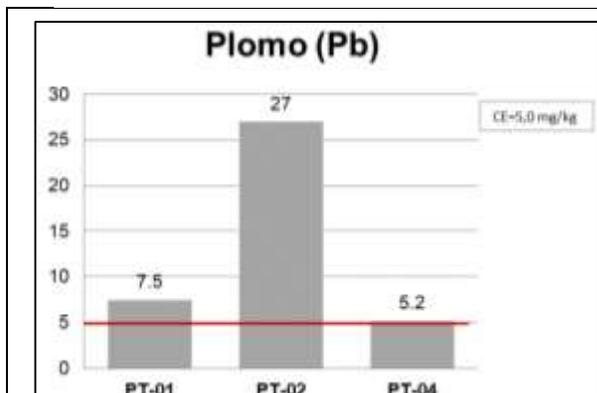


Figura 5 Concentración de Plomo en las estaciones evaluada

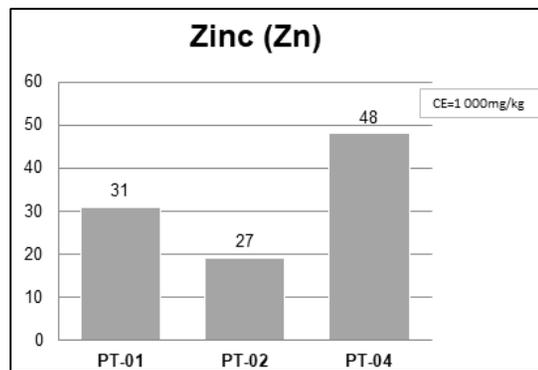


Figura 6 Concentración de Zinc en las estaciones evaluadas

Se puede observar que las estaciones PT-01, PT-2 y PT-4 presentan concentraciones de Zinc con niveles bajos lo cual se deduce que estas concentraciones no ocasionarían efectos adversos a la biota acuática ni terrestre específicamente a las especies palatales consumidas por el ganado.

4. CONCLUSIONES

- Los macrófitos estuvieron representados por tres especies; *Anomobryum prostratum*, *Marchantia Polymorpha* L. y *Bryofita sp.* distribuidas en 2 Clases (Bryopsida y Marchantiopsida), 2 Órdenes (Bryales, Marchantiales) y 2 Familias (Bryaceae y Marchantiaceae). El “musgo” *Anomobryum prostratum* fue el de mayor frecuencia estando presente en los puntos MAC-2, MAC-3 y MAC-5. A diferencia del punto de evaluación MAC-1 se registró únicamente a la especie *Marchantia Polymorpha* L. “Musgo” mientras que en el punto MAC-4 estuvo presente la especie *Bryophyta sp.*
- *Anomobryum prostratum* presentó una abundancia que varió en escala de 2 a 3 (MAC-2, MAC-3 y MAC-5), mientras que la especie *Bryophyta sp.* presentó una abundancia en escala de 2, Finalmente *Marchantia Polymorpha* L. fue registrado únicamente en el punto (MAC-4). en donde presentó una abundancia en escala de 2.
- En cuanto a la acumulación de metales pesados en el tejido vegetal (acuático), se tiene que el elemento Mercurio (Hg) estuvo ausente y no detectables en el caso de las estaciones MAC-01 y MAC - 05, en comparación con las estaciones MAC-02, MAC-03 y MAC-04 presenta valores por encima del (LD). Del

método analítico empleado por el laboratorio. Las concentraciones de mercurio y todos los demás parámetros, estuvieron ausentes en la estación MAC-05. Mientras que el Selenio (Se) estuvo ausente y no detectable en las estaciones MAC-01, MAC-02, MAC- 04 y MAC-05, mientras la estación MAC-03 con valor de 0.1 mg/kg, encontrándose por encima del límite de detección.

- De las tres especies de macrófitas *Anomobryum prostratum* “musgo”, presenta una mayor capacidad para la acumulación de metales puesto que registró en la mayoría de los casos las más altas concentraciones de elementos (Arsénico, Cobre, Cromo, Manganeso, y Zinc) en comparación con el resto de las especies.
- Las macrófitas acumulan con facilidad los siguientes metales Zinc (Zn) con $R^2=89.74\%$, seguido del Mercurio (Hg) con $R^2=75.02\%$. y Cadmio (Cd) $R^2=72.19\%$. Finalmente, el menor coeficiente de regresión lo presentó el Plomo (Pb) con $R^2=38.59\%$.
- En el caso del tejido vegetal acuático o macrofitós se evidenciaron relaciones fuertes con las concentraciones de metales de sedimento acuático. Estos resultados podrían deberse a varios factores, hay que tener en cuenta que la toxicidad de los metales no depende solamente de su concentración total.

- En el caso del tejido vegetal terrestre, se evidenciaron relaciones fuertes con las concentraciones de metales del suelo. Estos resultados podrían deberse a muchos factores, por lo que se debe tener en cuenta que la toxicidad de los metales no depende solamente de su concentración total.
- Con respecto a la concentración de metales en tejido vegetal terrestre (Plantas terrestre), se pudo apreciar que existe una fuerte relación entre las concentraciones de Cromo ($R^2=86.16\%$) de las plantas terrestre con respecto a las concentraciones en sedimento. Seguido de Mercurio ($R^2=85.49\%$). El resto de los metales no presentaron relaciones estadísticamente significativas. De esta manera podremos concluir si la concentración metales presentes en la matriz (sedimento, guardan una relación significativa con la concentración de metales en las especies objeto de estudio).
- El análisis de metales pesados realizados en tejido vegetal de plantas terrestre en las estaciones de monitoreo del área de influencia de los Pasivos Ambientales Mineros, presentan bioacumulación de metales pesados (arsénico y plomo) superando en algunas estaciones, las concentraciones máximas establecidas por la Unión Europea (Real Decreto 747/2001. España) y por la AAFCO (1996) Association of American Feed Control Officials. Se tiene así, que las estaciones PT-2 con 6.5 mg/kg según la legislación de la Unión Europea (Real Decreto 747/2001. España) el Arsénico se encuentran por encima del contenido máximo permitido (2 mg/kg), mientras que los valores altos para el Plomo en las estaciones PT-1, PT-2 y PT-4 tendría características propias de los componentes del suelo que estarían determinando valores altos, teniendo en cuenta que el uso del suelo es de tipo minero.
- Las concentraciones de metales están asociadas a los Pasivos Ambientales Mineros, debido a que estos se encuentran a cierta distancia de ellos. Las estaciones distantes

presentaron también cierta concentración de metales debido a que en algunos casos la contaminación puede darse por las condiciones climatológicas (arrastre de mineral por escorrentía, por viento, entre otras).

5. BIBLIOGRAFÍA

- AAFCO. (1996) 'Association of American Feed Control Officials', *Official Publication*. pp. 230.
- Baker, A.J.M. (1981) 'Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutrition', *Department of Botany, University of Sheffield, S. Yorkshire, ZTN, U.K.* pp. 643-654.
- Barceló, J. y Poschenrieder, C. (2003) 'Phytoremediation: principles and perspectives. Contributions to Science', *Institut d'Estudis Catalans, Barcelona*, pp. 333-344.
- Fernandez, Leborans, G. and Olalla-Herrero, Y. (2000) 'Toxicity and bioaccumulation of lead and cadmium in marine protozoa communities' *Ecotoxicol. and Environ. Saf.* 47: 266-276.
- Kataba-Pendias, A. (2000) 'Trace elements in soils and plants', Third Edition. CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 413.
- Lasat MM. (2000) 'The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil', *American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow*, pp. 33.
- Ministerio de Salud del Perú. (2007) 'Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales', aprobado mediante Resolución Directoral N° 2254-2007-DIGESA/SA de Perú. pp. 8.
- Ministerio de Medio Ambiente de España. (2005) 'Protocolos de muestreo y análisis para Macrófitos'. pp. 26.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2001. Real Decreto 747, donde se establecen las sustancias y productos indeseables en la alimentación animal. Anexo I.

Artículo recibido en: 09.04.2019

Artículo aceptado: 20.05.2019