

## BIOACUMULACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (EPT) POR *SARCOCORNIA NEEI* EN UN HUMEDAL COSTERO DEL PERÚ

JOSEPH ROSAS<sup>1</sup>, JOSE IANNAcone<sup>1-2-3-\*</sup>

Recibido: 19/06/2020

Recibido con revisiones: 19/08/2020

Aceptado: 19/08/2020

### RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la bioacumulación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) por el tallo de *Sarcocornia neei* del Área de Conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. Se extrajeron muestras del tallo de *S. neei* y del suelo superficial (0-10 cm) provenientes de tres zonas geográficas del humedal: Zona turística (ZT), zona de uso silvestre (ZS) y zona de recuperación (ZR). Se analizaron concentraciones de 15 EPT de la planta y el suelo obtenidas por espectrometría de masas con plasma acoplado (ICP-MS), parámetros fisicoquímicos del suelo y factores de bioacumulación de cada EPT. Se realizó un dendrograma de similaridad euclidiana entre las zonificaciones según las concentraciones de EPT en suelo y una correlación de Spearman entre las variables evaluadas. Las concentraciones de plomo (Pb) en suelo de la ZT<sub>1</sub> (99,1 mg kg<sup>-1</sup>) y en la ZS<sub>1</sub> (120 mg kg<sup>-1</sup>) excedieron el estándar de calidad ambiental de Perú (70 mg kg<sup>-1</sup>). Según el Codex Alimentarius los EPT en el tallo de *S. neei* excedieron los valores para arsénico (As) (0,35 mg kg<sup>-1</sup>) la ZT<sub>2</sub> y ZR<sub>1</sub>, para cadmio (Cd) (0,4 mg kg<sup>-1</sup>) la ZT<sub>3</sub> y ZS<sub>2</sub> y para Pb (0,4 mg kg<sup>-1</sup>) la ZT<sub>2</sub>, ZT<sub>3</sub>, ZR<sub>2</sub> y ZR<sub>3</sub>, respectivamente. En general, *Sarcocornia neei* presentó las tres estrategias de acumulación de EPT (exclusor, tolerante y acumulador). La zonificación no presentó relación significativa con los EPT del suelo, EPT del tallo de *S. neei*, ni con los factores de bioacumulación (FB) de *S. neei*. Solamente la conductividad eléctrica y la materia orgánica se asociaron con la bioacumulación de dos EPT (Co y Fe). Se concluye que la zonificación no determina la concentración de EPT en suelo superficial y presenta una baja contaminación por EPT. Finalmente, las estrategias de acumulación de EPT por *S. neei* son altamente variables.

**Palabras clave:** Acumulación, contaminación, estándar de calidad ambiental, suelo.

## BIOACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS (EPT) BY *SARCOCORNIA NEEI* IN A COASTAL WETLAND FROM PERU

### ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate the bioaccumulation of potentially toxic elements (EPT) by the *Sarcocornia neei* stem of the Regional Conservation Area (ACR) Humedales de Ventanilla, Callao Region, Peru. Samples of the stem of *S. neei* and of the surface soil (0-10 cm) were extracted from three geographical areas of the wetland: tourist zone (ZT), wild use zone (ZS) and recovery zone (ZR). 15 EPT concentrations of the plant and the soil obtained by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS), physicochemical parameters of the soil and bioaccumulation factors of each EPT were analyzed. A Euclidean similarity dendrogram was performed between the zoning according to the concentrations of EPT in the soil and a Spearman correlation between the variables evaluated. The concentrations of Pb (lead) in soil in ZT<sub>1</sub> (99.1 mg kg<sup>-1</sup>) and in ZS<sub>1</sub> (120 mg kg<sup>-1</sup>) exceeded the environmental quality standard of Peru (70 mg kg<sup>-1</sup>). According to the Codex Alimentarius, the EPT in the stem of *S. neei* exceeded the values for arsenic (As) (0.35 mg kg<sup>-1</sup>) the ZT<sub>2</sub> and ZR<sub>1</sub>, for cadmium (Cd) (0.4 mg kg<sup>-1</sup>) the ZT<sub>3</sub> and ZS<sub>2</sub> and for Pb (0.4 mg kg<sup>-1</sup>) the ZT<sub>2</sub>, ZT<sub>3</sub>, ZR<sub>2</sub> and ZR<sub>3</sub>, respectively. *Sarcocornia neei* presented the three accumulation strategies of EPT (exclusor, tolerant and accumulator). The zoning did not present a significant relationship with the soil EPT, the *S. neei* stem EPT, nor with the bioaccumulation factors (FB) of *S. neei*. Only electrical conductivity and organic matter were associated with the bioaccumulation of two EPTs (Co and Fe). It is concluded that zoning does not determine the concentration of EPT in surface soil and presents a low contamination by EPT. Finally, the accumulation strategies of EPT by *S. neei* are highly variable.

**Key words:** Accumulation, contamination, environmental quality standards, soil.

1 Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA). Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA). Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG). Universidad Nacional Federico Villarreal, El Agustino. Perú

2 Laboratorio de Parasitología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Ricardo Palma, Santiago de Surco. Perú

3 Facultad de Ciencias Ambientales, Escuela de Ingeniería Ambiental, COEPERU - Coastal Ecosystems of Peru Research Group, Universidad Científica del Sur, Defensores del Morro, Lima. Perú

\* Autor de contacto: joseiannaconeoliver@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La calidad del aire de la Región Callao, Perú se encuentra afectada por la presencia de partículas que exceden los niveles establecidos en el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, 2017, tales como el plomo (Pb) y material particulado (PM) 2.5 (GRC, 2011; MINAM, 2017a). Además, el transporte automovilístico aporta elementos potencialmente tóxicos (EPT) al aire, tales como el cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) (Su *et al.*, 2014). En este sentido, Hou *et al.* (2014) mencionan que la depositación atmosférica es la principal fuente de introducción de metales al suelo cuando se consideran a escala regional.

Los humedales costeros son ecosistemas extremadamente sensibles que representan la interfase entre ambientes terrestres y marinos (Meza *et al.*, 2018), además el Área de Conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla, en el Callao, Perú es considerado parte de un ecosistema fragmentado (Aponte & Cano, 2013) y presenta EPT en los cuerpos de agua, tales como arsénico (As), Cd, mercurio (Hg) y Pb (Fajardo *et al.*, 2017).

La salicornia [*Sarcocornia neei* (Lag.) M.A. Alonso & M.B. Crespo], es una macrófita halófila que presenta potencial alimenticio por el consumo del tallo y de fitorremediación de EPT (Riquelme *et al.*, 2016; Meza *et al.*, 2018). Asimismo, *S. neei* compone la comunidad vegetal más extensa (79.3 ha) dentro del ACR Humedales de Ventanilla (GRC, 2009).

Las plantas halófitas presentan una inherente capacidad a tolerar altas concentraciones de EPT en el suelo, por lo que se ha sugerido que existen una tolerancia cruzada que se puede atribuir a algún tipo de mecanismo de interferencia entre la salinidad y el estrés oxidativo y osmótico a los metales. Estas plantas muestran los tres mecanismos de desintoxicación biológica para combatir la toxicidad de los metales, a saber, exclusivos, tolerantes y acumuladores de iones metálicos (González-Alcaraz *et al.*, 2011; Nikalje & Suprasanna, 2018). Resulta importante utilizar plantas halófitas nativas para la fitorremediación de sitios contaminados como “candidatas a la tecnología verde”, porque estas plantas se encuentran adaptadas naturalmente en términos de supervivencia,

crecimiento y reproducción bajo el estrés ambiental en suelos de mala calidad, poco fértiles y tierra marginales frente a aquellas plantas introducidas de otro ecosistema (Chandra *et al.*, 2017; Nikalje & Suprasanna, 2018).

El objetivo del presente estudio fue comparar las concentraciones de EPT en suelo superficial entre tres zonificaciones geográficas con diversos grados de impacto antrópico, determinar el nivel de contaminación del suelo superficial y analizar la bioacumulación del tallo de *S. neei* del ACR Humedales de Ventanilla.

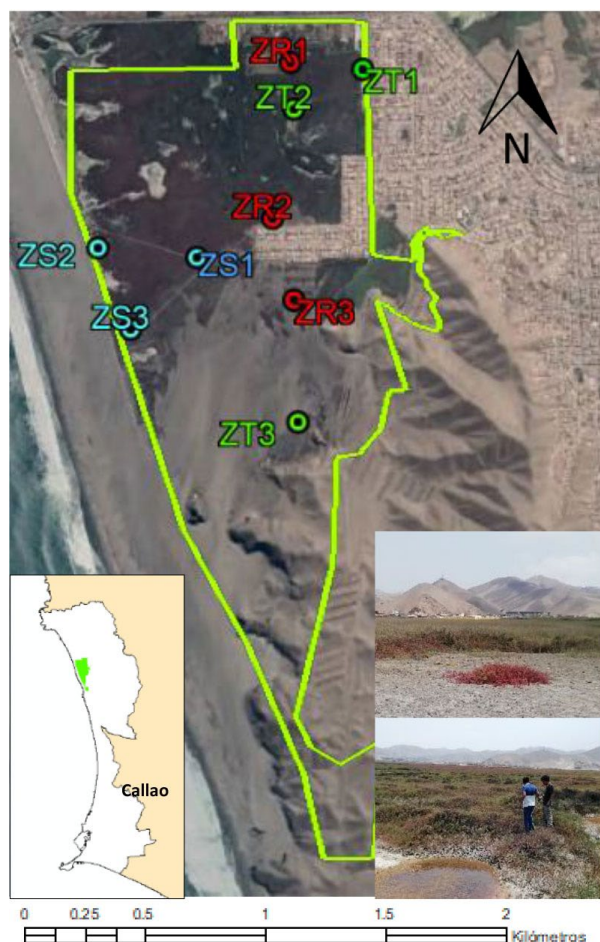
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Extracción de la muestra

Las comparaciones entre las concentraciones de EPT en suelo superficial y *S. neei* se realizaron en la zona turística (ZT), zona de uso silvestre (ZS) y zona de recuperación (ZR), pertenecientes al ACR Humedales de Ventanilla. La ZT se caracteriza por contar con infraestructura turística y presentar un continuo tránsito de personas, la ZS es un espacio silvestre y presenta casi nula intervención humana y la ZR contiene áreas degradadas por intervención humana como restos de viviendas y pequeñas granjas (GRC, 2009).

Mediante un muestreo aleatorio estratificado se determinaron tres ubicaciones geográficas por zona geográfica (ZT, ZS y ZR), ubicadas en regiones no inundadas, resultando en nueve puntos de muestreo (**Figura 1**). En cada ubicación geográfica se extrajeron tres ejemplares de *S. neei* sin daño mecánico por plagas o enfermedades. *S. neei* es una especie herbácea de tallos suculentos con crecimiento horizontal o vertical (Riquelme *et al.*, 2016; La Rosa *et al.*, 2020), suelen formar grandes comunidades una altura aproximada de 30 cm. Además se extrajo una muestra de suelo de los primeros 10 cm de profundidad, la cual representa la zona de exploración de raíces de *S. neei*. Las muestras de macrófitas y de suelo fueron almacenadas en bolsas de polietileno.

Posteriormente, todas las muestras fueron preservadas a 4°C hasta la realización de los análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo y de EPT de macrófitas y suelo.



**Figura 1.** Localización de los puntos de muestreo. Extraído de Google Earth Pro 2020. ZT1=Zona Turística 1, ZT2=Zona turística 2, ZT3=Zona Turística 3, ZR1=Zona de Recuperación 1, ZR2= Zona de Recuperación 2, ZR3=Zona de Recuperación 3, ZS1=Zona de uso Silvestre 1, ZS2=Zona de uso Silvestre 2 y ZS3=Zona de uso Silvestre 3.

**Figure 1.** Location of the sampling points. Extracted from Google Earth Pro 2020. ZT1 = Tourist Zone 1, ZT2 = Tourist Zone 2, ZT3 = Tourist Zone 3, ZR1 = Recovery Zone 1, ZR2 = Recovery Zone 2, ZR3 = Recovery Zone 3, ZS1 = Zone Wild use 1, ZS2 = Wild use zone 2 and ZS3 = Wild use zone 3.

### Parámetros fisicoquímicos

El Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos establecido por Zagal & Sadzawka (2007) fue utilizado para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del suelo (fracción <2mm): mediciones analíticas de pH (1:2.5  $\text{mv}^{-1}$ ), conductividad eléctrica (1:5  $\text{mv}^{-1}$ ), contenido de agua (en estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 h) y materia orgánica del suelo (en estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 h y posteriormente a  $550^{\circ}\text{C}$  durante 2 h).

### Elementos potencialmente tóxicos

La determinación de As, antimonio (Sb), Cd, cobalto (Co), Cr, Cu, estroncio (Sr), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), Pb, selenio (Se), vanadio (V) y Zn en suelo se realizó de acuerdo a la Agencia de Protección ambiental.200.7 (EPA.200.7), Revisión 4.4 (USEPA, 1994). Las muestras de suelo fueron solubilizadas por reflujo suave con ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), posterior a la sedimentación, se agregó  $\text{HNO}_3$  a la muestra acuosa y se sometió a la lectura por el espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, Nex ION 2000B).

La determinación de Hg en suelo se realizó de acuerdo al método EPA 7471-B, Rev 2 (USEPA, 2007). Se utilizaron alícuotas homogenizadas de 0,5 – 0,6 g, luego fueron diluidas con 5 mL de agua reactiva y 5 mL de agua regia, calentadas a  $95 \pm 3^{\circ}\text{C}$  y dejadas a enfriar. Se agregaron 50 mL de agua reactiva y 15 mL de solución de permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) y se dejó reposar por 15 min. Se mezcló la muestra y fue calentada durante 30 min a  $95 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Luego de enfriar se agregó 6 mL de cloruro de sodio-sulfato de hidroxilamonio ( $\text{NaCl}-(\text{HONH}_3)_2\text{SO}_4$ ) para reducir el exceso de  $\text{KMnO}_4$  y se sometió a lectura por absorción atómica de acuerdo a la metodología estipulada.

La determinación de As, Sb, Cd, Co, Cr, Cu, Sr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, V y Zn presentes en el tallo de *S. neei* se realizó de acuerdo al EPA.200.3 (USEPA, 1991). Se tomaron 5 g de muestra compuesta de los tres tallos congelados, sin diferenciación de la porción del tallo seleccionada y fueron digeridos con  $\text{HNO}_3$ , peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y calor. Esta digestión resultó en una solución clara que fue analizada por ICP-MS (Nex ION 2000B).

### Análisis de datos

#### Comparaciones con estándares de calidad ambiental

Las concentraciones de EPT en suelo fueron comparadas con los niveles máximos permitidos en el estándar de calidad ambiental (ECA) – suelo – Perú - 2017 para suelo agrícola, cuya nor-

mativa aplica a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) (MINAM, 2017b). Las concentraciones de EPT en el tallo de *S. neei* fueron comparadas con las concentraciones máximas permitidas para EPT en especies vegetales establecidas en el Codex Alimentarius (CA). Asimismo, no se tomaron en cuenta las concentraciones establecidas en chocolates, debido a que es un producto manufacturado (CA, 1995).

### Índices de contaminación del suelo

Para la determinación de los índices de contaminación del suelo superficial se utilizó la media de las concentraciones de EPT ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de los nueve puntos de muestreo. Se otorgaron valores enteros a todas las concentraciones a fin de obtener las medias de las concentraciones para calcular los índices. De acuerdo a lo establecido por Qingjie *et al.* (2008), se obtuvieron dos índices de contaminación de suelo simple: factor de contaminación ( $C_{fi}$ ), factor de riesgo ecológico ( $Er^j$ ); y cinco integrados: índice de riesgo ecológico potencial (RI), promedio de índice de contaminación ( $PI_{Avg}$ ), nuevo índice de contaminación (PIN), grado de contaminación ( $C_d$ ) y el índice de contaminación de Nemerow ( $PI_{Nemerow}$ ).

Asimismo, en el caso del  $C_{fi}$  se reemplazaron solamente los valores de referencia pre industrial de EPT de Co, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) por las concentraciones halladas en el sedimento cerca a la naciente del Río Chillón debido a ser afluente del área de estudio (Chui *et al.*, 2009).

### Factor de Bioacumulación (FB) del tallo de *S. neei*

Este factor fue calculado como la relación entre los EPT acumulados en el tallo de *S. neei* y concentración de EPT del sedimento (Jara-Peña *et al.*, 2017).

$$FB = C_{\text{tallo}} / C_{\text{suelo}}$$

Donde: FB = Factor de bioacumulación.  $C_{\text{tallo}}$  = Concentración de EPT en el tallo de la planta.  $C_{\text{suelo}}$  = Concentración de EPT en suelo.

El factor de bioacumulación (FB) indicó si el tallo de *S. neei* presenta estrategias de acumulación y puede ser considerado como acumulador, tolerante o exclusor a los EPT. Las plantas

con  $FB > 1$  son considerados como acumuladoras o hiperacumuladoras (si las concentraciones exceden 0,1 %), las que presentan valores entre 0,1 y 1, respectivamente, son consideradas como tolerantes y las que presentan valores  $< 0,1$  se consideran como plantas exclusoras (Trujillo, 2013).

### Análisis estadísticos

No fueron considerados los EPT sin variaciones en sus concentraciones debido a que no otorgaban variabilidad a los análisis estadísticos. Se realizó un Dendrograma de similaridad euclidiana con Grupos Pareados (PGMA) a fin de observar el grado de relación entre las zonas muestreadas de acuerdo al contenido de EPT en suelo. Asimismo, se realizó la prueba de correlación de Spearman ( $r_s$ ) entre los parámetros fisicoquímicos del suelo, la concentración de EPT en suelo y planta, la bioacumulación de EPT y la zonificación a fin de determinar las variables que presentaron correlación significativa entre sí y su significancia ( $p \leq 0,05$ ). Para la realización de estos análisis se utilizó el programa Paleontological statistics software package 4,0 (Past 4,0).

## RESULTADOS

### Parámetros fisicoquímicos del suelo

En  $ZR_3$  se hallaron los mayores valores de pH (8,46) y conductividad eléctrica ( $19,35 \text{ mS cm}^{-1}$ ) del suelo. Mientras que en  $ZR_1$  se halló el mayor contenido de agua (27,12 %) y en  $ZT_3$  la mayor concentración de materia orgánica del suelo (47,64%) (Tabla 1).

### EPT en el suelo superficial

Mn, Zn, V, Cu, Pb y Fe fueron los EPT que presentan mayor concentración en el suelo. Además, las concentraciones de EPT pertenecientes a  $ZT_1$  no excedieron la normativa de comparación y solamente las concentraciones de Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en  $ZT_1$  ( $99,1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y  $ZS_1$  ( $120 \text{ mg kg}^{-1}$ ) resultaron mayores a los límites máximos establecidos por el ECA – suelo – Perú - 2017 ( $70 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (MINAM, 2017b) (Tabla 2).

**Tabla 1.** Valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo aledaño a las muestras de *Sarcocornia neei* en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

**Table 1.** Values of the physicochemical parameters of the soil surrounding the *Sarcocornia neei* samples in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru.

Zonificación	pH	Conductividad Eléctrica (mScm <sup>-1</sup> )	Contenido de Agua (g kg <sup>-1</sup> )	Materia Orgánica (g kg <sup>-1</sup> )
ZT <sub>1</sub>	7,91	7,61	<u>3,06</u>	4,34
ZT <sub>2</sub>	7,83	5,88	25,44	22,28
ZT <sub>3</sub>	7,82	3,45	25,26	<b>47,64</b>
ZR <sub>1</sub>	<u>7,69</u>	<u>2,60</u>	<b>27,12</b>	34,70
ZR <sub>2</sub>	7,78	2,52	21,92	29,92
ZR <sub>3</sub>	<b>8,46</b>	<b>19,35</b>	14,86	20,46
ZS <sub>1</sub>	7,85	5,38	24,34	31,69
ZS <sub>2</sub>	8,17	8,15	11,11	14,04
ZS <sub>3</sub>	8,04	2,69	3,43	<u>1,10</u>

“subrayado”=valor mínimo, “negrita”=valor máximo. Zonas geográficas del humedal. Zona turística: ZT. Zona de uso silvestre: ZS. Zona de recuperación: ZR.

**Tabla 2.** Comparación de los contenidos de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en suelo (mg kg<sup>-1</sup>) con los rangos permitidos para suelo agrícola por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) 2017 en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

**Table 2.** Comparison of the contents of potentially toxic elements (PTE) in soil (mg kg<sup>-1</sup>) with the ranges allowed for agricultural soil by the Environmental Quality Standard (ECA) 2017 in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru.

“negrita” =Aplicado en valores que exceden el ECA para suelos agrícolas del 2017. Zonas geográficas del humedal. Zona turística: ZT. Zona de uso silvestre: ZS. Zona de recuperación: ZR. Desviación estándar: DE. Valor mínimo: Min. Valor máximo: Max.

EPT	ZT <sub>1</sub>	ZT <sub>2</sub>	ZT <sub>3</sub>	ZR <sub>1</sub>	ZR <sub>2</sub>	ZR <sub>3</sub>	ZS <sub>1</sub>	ZS <sub>2</sub>	ZS <sub>3</sub>	ECA suelo (2017) - Perú (mg kg <sup>-1</sup> )	Min	Max	DE
As	12,13	3,84	14,17	1,62	15,06	18,22	17,07	10,79	6,52	50	1,62	18,22	5,88
Sb	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	5,5	0,9	<0,6	-	0,60	5,50	1,62
Cd	0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	0,81	<0,17	<0,17	<0,17	1,4	0,17	0,81	0,21
Co	6,73	5,55	7,85	4,79	7,97	5,65	6,65	5,56	4,95	-	4,79	7,97	1,17
Cr	7,13	5,75	10,33	8,27	13,98	9,55	10,86	6,14	10,35	No especifica	5,75	13,98	2,62
Cu	24,08	16,76	16,53	8,74	40,75	53,42	318,0	15,17	12,92	-	8,74	318,0	99,22
Sr	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	-	-	-	-
Fe	13,66	12,29	21,46	14,92	25,59	16,89	21,26	14,89	21,02	-	12,29	25,59	4,49
Mn	264,5	178,9	241,1	162,6	212,2	201,7	207,5	168,5	182,9	-	162,6	264,5	33,80
Hg	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	6,6	-	-	-
Ni	3,35	3,71	2,18	2,19	4,23	5,86	2,40	2,69	2,46	-	2,18	5,86	1,22
Pb	<b>99,1</b>	7,2	<0,3	<0,3	49,5	57,7	<b>120,0</b>	3,9	<0,3	70	0,30	120	46,57
Se	<1,0	<1,0	3,0	<1,0	2,0	<1,0	4,0	<1,0	<1,0	-	1,00	4,00	1,12
V	34,59	32,36	75,49	44,85	99,69	61,05	81,56	48,55	77,13	-	32,36	99,69	23,24
Zn	62,42	80,76	45,08	36,86	132,3	169,4	143,9	55,17	38,59	-	36,86	169,4	50,39

### EPT en el tallo de *Sarcocornia neei*

Las concentraciones de EPT en el tallo de *S. neei* excedieron al menos en un punto los límites establecidos por los estándares utilizados, mientras que las concentraciones de EPT

en el tallo de *S. neei* en ZT<sub>1</sub> no excedieron las concentraciones establecidas en el CA (1995). Zn, Fe, Mn, Cu, Pb y Cr fueron los EPT que presentaron mayor concentración en el tallo de *S. neei* (**Tabla 3**).

**Tabla 3.** Comparación del contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en  $\text{mg kg}^{-1}$  del tallo de *Sarcocornia neei* con el máximo aceptado para vegetales según Codex Alimentarius en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

**Table 3.** Comparison of the content of potentially toxic elements (PTE) in  $\text{mg kg}^{-1}$  of the stem of *Sarcocornia neei* with the maximum accepted for vegetables according to Codex Alimentarius in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru.

EPT	ZT <sub>1</sub>	ZT <sub>2</sub>	ZT <sub>3</sub>	ZR <sub>1</sub>	ZR <sub>2</sub>	ZR <sub>3</sub>	ZS <sub>1</sub>	ZS <sub>2</sub>	ZS <sub>3</sub>	Codex Alimentarius
As	<0,03	1,57	<0,03	1,59	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,17	0,35
Sb	0,11	<0,02	0,85	<0,02	2,75	1,38	<0,02	<0,02	<0,02	-
Cd	0,23	0,16	<b>0,59</b>	0,13	0,35	0,39	0,34	<b>0,55</b>	0,39	0,4
Co	0,59	0,35	1,32	0,50	1,27	0,26	0,95	0,33	0,94	-
Cr	1,01	0,47	0,53	0,27	0,56	0,24	0,49	0,51	0,10	-
Cu	6,32	11,91	16,19	5,83	13,77	9,48	21,10	12,74	12,26	NE
Sr	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	NE
Fe	62	73	170	73	139	61	152	76	84	NE
Mn	12,35	12,33	18,37	12,03	22,54	17,58	12,31	14,51	21,44	-
Hg	<0,00	<0,00	0,03	<0,00	<0,00	<0,00	0,03	<0,00	0,03	NE
Ni	<0,02	<0,02	1,40	0,15	<0,02	0,07	0,49	<0,02	0,67	-
Pb	<0,02	<b>1,07</b>	<b>8,22</b>	<0,02	<b>2,98</b>	<b>4,31</b>	<b>4,73</b>	<b>7,43</b>	<b>3,72</b>	0,4
Se	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,09	<0,04	0,59	<0,04	<0,04	-
V	0,54	0,71	1,71	0,32	0,95	0,45	1,83	1,02	1,26	-
Zn	22,75	61,10	76,82	20,93	42,36	41,91	47,29	40,34	31,54	-

NE= no específica, "negrita" =concentraciones de EPT que exceden el límite máximo establecido por el Codex Alimentarius. Zonas geográficas del humedal. Zona turística: ZT. Zona de uso silvestre: ZS. Zona de recuperación: ZR.

### Índices de contaminación del suelo

De acuerdo a los índices de contaminación simple, se halló que los factores de contaminación ( $C_{fi}$ ) en su mayoría presentaron valores entre 0 y 0,97, lo que indica un bajo factor de contaminación ( $C_{fi} < 1$ ) del suelo superficial por cada EPT; sin embargo en el caso del Cu el  $C_{fi}$  resultó 4,32; indicando una contaminación considerable para este elemento en el suelo superficial. Asimismo, los factores de riesgo ecológico ( $E_{ri}$ ) presentaron valores entre 0,20 y 21,63, lo que indica un bajo

riesgo ecológico potencial ( $C_{fi} < 40$ ) en el suelo superficial por cada EPT (**Tabla 4**).

En cuanto a los índices de contaminación integrados, el suelo superficial presentó un bajo riesgo ecológico potencial ( $R_I = 46,66$ ), un bajo promedio del índice de contaminación ( $PI_{Avg} = 0,27$ ), presenta trazas según el nuevo índice de contaminación ( $PI_N = 8,51$ ), un bajo grado de contaminación ( $C_d = 8,17$ ), y un dominio saludable de acuerdo al Índice de Contaminación Nemerow ( $PI_{Nemerow} = 0,03$ ).

**Tabla 4.** Índices de contaminación simples del suelo en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

**Table 4.** Simple soil pollution indices in the ACR Ventanilla Wetlands, Callao Region, Peru.

		As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Referencia preindustrial	Håkanson (1980)	15	1		90	50		0,25			70	175
	Rio Chillón			11,7		13	26000		826		42	87
ACR HV(X)		11,05	0,24	6,19	9,15	56,26	18,00	0,030	202,21	3,23	37,59	84,94
$C_{fi}$		0,73	0,24	0,53	0,10	4,32	0	0,12	0,24		0,89	0,97
$E_{ri}$		7,36	7,20		0,20	21,63		4,80			4,47	0,97

Referencia Pre industrial= Nivel de referencia pre industrial del metal pesado. ACR HV (X)= Promedio de la concentración de elementos potencialmente tóxicos del ACR Humedales de Ventanilla ( $\text{mg kg}^{-1}$ )  $C_{fi}$  = factor de contaminación.  $E_{ri}$  = riesgo ecológico potencial.

### Bioacumulación de EPT en el tallo de *S. neei*

El FB de Fe de *S. neei* presenta una estrategia acumuladora en todas las zonas de estudio. Sin embargo, presenta FB exclusores y tolerantes en la mayoría de EPT (As, Co, Cr, Cu, Mn, Hg, Ni, Se y V), tolerante y acumulador en el caso del Cd y Zn, y presenta las tres estrategias de acumulación en el caso del Sb y Pb (Figura 2).

### Asociación entre zonificación, parámetros fisicoquímicos del suelo, EPT y FB

De acuerdo al dendrograma de similitud euclidiana, la zonificación no determina el agrupamiento de las concentraciones de EPT en el suelo (Figura 3). Asimismo, de acuerdo al análisis de correlación de Spearman, la zonificación no presentó relación significativa ( $p < 0,05$ ) con los EPT del suelo ( $p = 0,17-1$ ), EPT del tallo de *S. neei* ( $p = 0,28-0,99$ ), ni con los FB ( $p = 0,16-0,95$ ).

No hubo relación significativa ( $p < 0,05$ ) entre los parámetros fisicoquímicos del suelo y los EPT del suelo ( $p = 0,1-1$ ). Sin embargo, la conductividad eléctrica del suelo se correlacionó negativamente con la concentración en la planta de Co ( $r = -0,7$ ,  $p = 0,04$ ) y su FB ( $r = -0,8$ ,  $p = 0,01$ ), mientras que la materia orgánica se correlacio-

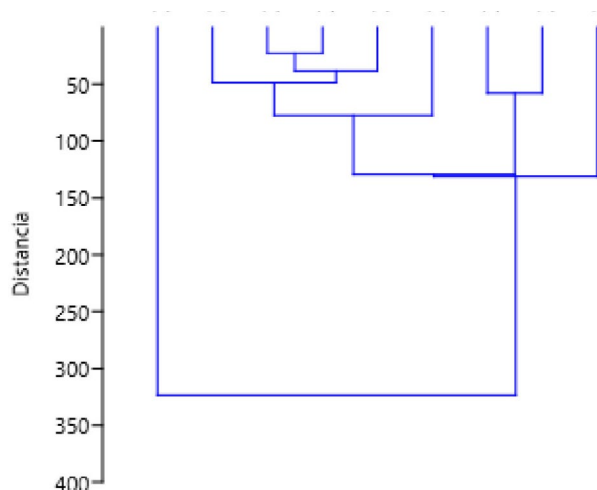


Figura 3. Dendrograma de similitud euclidiana con grupos pareados (PGMA) para elementos potencialmente tóxicos (EPT) del suelo en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. Zonas geográficas del humedal. Zona turística: ZT. Zona de uso silvestre: ZS. Zona de recuperación: ZR.

Figure 3. Dendrogram of Euclidean similarity with paired groups (PGMA) for potentially toxic elements (EPT) of the soil in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru. Geographical areas of the wetland. Tourist area: ZT. Wild use area: ZS. Recovery zone: ZR.

nó positivamente con el FB de Fe ( $r = 0,7$ ,  $p = 0,04$ ) (Tabla 5). Las concentraciones en suelo de As, Cu, Ni, Pb y Zn se correlacionaron negativamente con sus FB (Tabla 6).

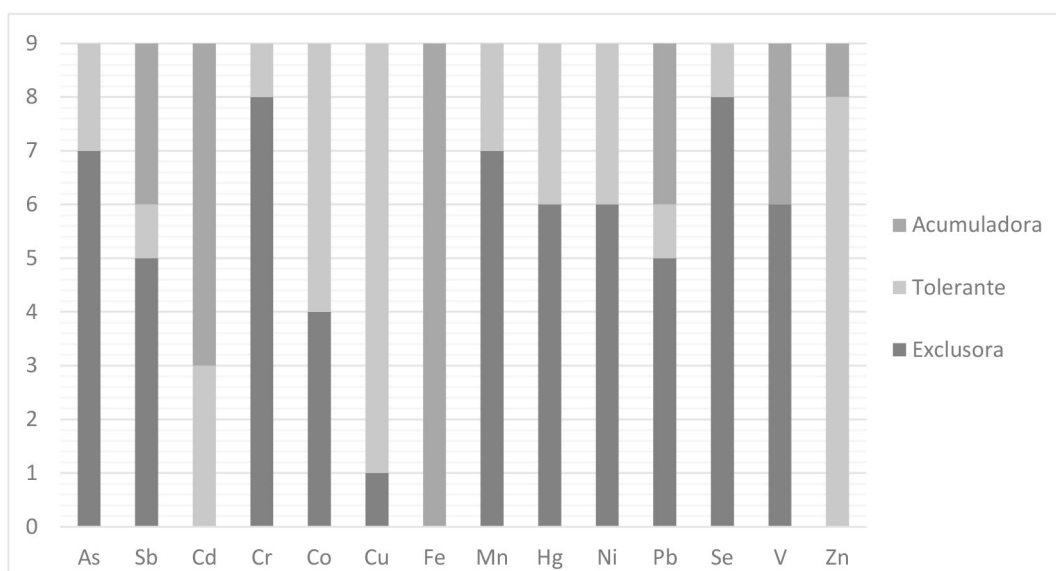


Figura 2. Distribución en barras de estrategias de acumulación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) por el tallo de *Sarcocornia neei* en número de ejemplares en el área de conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

Figure 2. Distribution in bars of the accumulation behavior of potentially toxic elements (EPT) by the stem of *Sarcocornia neei* in number of specimens in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru.

**Tabla 5.** Correlación de Spearman ( $r_s$ ) entre los parámetros fisicoquímicos y la concentración de Co, Fe en el tallo de *Sarcocornia neei* y sus factores de bioacumulación (FB) en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

**Table 5.** Spearman correlation ( $r_s$ ) between the physicochemical parameters and the concentration of Co, Fe in the stem of *Sarcocornia neei* and its bioaccumulation factors (FB) in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru.

	pH	CE	H <sub>2</sub> O	MO	Co-SN	Fe-SN	FB-Co	FB-Fe
pH		0,01	0,03	0,03	NC	NC	NC	NC
CE	0,8		NC	NC	0,04	NC	0,01	NC
H <sub>2</sub> O	-0,71	NC		0,00	NC	NC	NC	NC
MO	-0,73	NC	0,85		NC	NC	NC	0,04
Co-SN	NC	-0,7	NC	NC		0,01	0,00	NC
Fe-SN	NC	NC	NC	NC	0,82		0,02	0,02
FB-Co	NC	-0,80	NC	NC	0,88	0,75		NC
FB-Fe	NC	NC	NC	0,70	NC	0,74	NC	

CE=Conductividad eléctrica, MO=Materia orgánica, H<sub>2</sub>O=Contenido de agua, Co-SN=Co en *S. neei*, Fe-SN=Fe en *S. neei*, FB-Co= FB del Co, FB-Fe=FB del Fe. NC= No correlacionados. Triángulo inferior de la tabla representa los valores de correlación. Triángulo superior de la tabla representa los valores de significancia.

**Tabla 6.** Correlación de Spearman ( $r_s$ ) entre elementos potencialmente tóxicos (EPT) del suelo y sus factores de bioacumulación (FB) de *Sarcocornia neei* en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

**Table 6.** Spearman's correlation ( $r_s$ ) between soil potentially toxic elements (EPT) and their bioaccumulation factors (FB) of *Sarcocornia neei* in the Ventanilla Wetlands ACR, Callao Region, Peru.

	As-SU	Cu-SU	Ni-SU	Pb-SU	Zn-SU	FB-As	FB-Cu	FB-Ni	FB-Pb	FB-Zn
As-SU		0,00	NC	NC	0,01	0,00	NC	NC	NC	NC
Cu-SU	0,85		NC	0,002	0,00	0,01	0,02	NC	NC	0,04
Ni-SU	NC	NC		NC	0,05	NC	NC	0,02	NC	NC
Pb-SU	NC	0,89	NC		0,00	0,05	0,00	NC	0,01	0,02
Zn-SU	0,78	0,95	0,68	0,84		0,02	0,03	NC	NC	0,03
FB-As	-0,95	-0,81	NC	-0,69	-0,75		NC	NC	NC	NC
FB-Cu	NC	-0,76	NC	-0,88	-0,73	NC		NC	0,00	0,00
FB-Ni	NC	NC	-0,76	NC	NC	NC	NC		NC	NC
FB-Pb	NC	NC	NC	-0,78	NC	NC	0,86	NC		0,02
FB-Zn	NC	-0,70	-NC	-0,74	-0,73	NC	0,90	NC	0,75	

As-SU=As en suelo. Cd-SU=Cd en suelo. Cu-SU=Cu en suelo. Ni-SU=Ni en suelo. Pb-SU=Pb en suelo. Zn-SU=Zn en suelo. NC= No correlacionados. Triángulo inferior de la tabla representa los valores de correlación. Triángulo superior de la tabla representa los valores de significancia.

## DISCUSIÓN

Al no hallar correlación significativa ( $p < 0,05$ ) entre la zonificación (ZT, ZS y ZR) y la concentración de EPT en suelo, estimamos que el grado de impacto antrópico de cada zona no afecta las concentraciones de los EPT en el suelo superficial y que existen otras fuentes de contaminación que afectan la concentración de los EPT en el suelo. El Río Chillón resulta en una fuente importante de ingreso de Co, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn al ACR Humedales de Ventanilla (Chui *et al.*, 2009). Una fuente posible de ingreso de EPT al suelo superficial es el aire de la

Región Callao que registra altos niveles de PM<sub>2,5</sub> y Pb (GRzC, 2011; MINAM, 2017), siendo el transporte automovilístico una fuente de contaminación por EPT (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn) a la atmósfera (Su *et al.*, 2014) y algunos elementos típicos encontrados en PM<sub>10</sub> resultaron ser el Cr, Ni, Pb y Zn (Machadoo *et al.*, 2008).

Adicionalmente, los EPT analizados entran a la atmósfera en forma de aerosol, excepto el Hg (Su *et al.*, 2014) y se halló que en el suelo superficial del ACR Humedales de Ventanilla la concentración de Hg resultó muy baja ( $< 0,03 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y la



deposición atmosférica es la principal fuente de introducción de EPT al suelo a escala regional (Hou *et al.*, 2014).

Las viviendas introducen el riesgo de contaminación del suelo por mal manejo de desechos e indirectamente por descargas de aguas domésticas, además se afecta la calidad de aire por emisión de MP durante la etapa de construcción (Vélez-Aspiazu & Coello-Espinoza, 2017) sin causar daños a los recursos naturales, para el efecto fue necesario establecer que el estudio ambiental tenga un alcance criterial. Tal situación requirió conocer las características del medio, tarea desarrollada como diagnóstico del medio físico, seguidamente caracterizar el proyecto de urbanización con adecuaciones ecológicas, e identificar qué acciones son las que causan impacto, y cuáles son los factores ambientales que se ven afectados por estas, desde la perspectiva de los impactos significativos planteados por la Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (EPA). Los residuos de animales aportan materia orgánica y nitrógeno al suelo (Rodríguez *et al.*, 2019). En el estudio la zonificación tampoco se correlacionó con los parámetros fisicoquímicos del suelo superficial ( $p > 0,05$ ) ni con los factores de bioacumulación de EPT del tallo de *S. neei* ( $p > 0,05$ ). Estos resultados indican que el grado de impacto antrópico presente en el ACR Humedales de Ventanilla no se asocia a los valores de pH, conductividad eléctrica, materia orgánica ni porcentaje de agua en el suelo superficial y además tampoco afecta la absorción de EPT por *S. neei*.

En el suelo del ACR Humedales de Ventanilla se halló que el Mn, Zn, V, Cu, Pb y Se se encuentran en mayor concentración, mientras que en el tallo de *S. neei* fueron el Zn, Fe, Mn, Cu, Pb y Cr. Debido a que el Zn, Fe, Mn, Cu, Cr, Co y Se son considerados elementos esenciales para las plantas (Bonanno *et al.*, 2017), *S. neei* presentó mayor acumulación de elementos químicos esenciales, que a su vez se encuentran en mayor cantidad en el suelo.

En el presente estudio se halló que *S. neei* presentó todas las estrategias de acumulación (exclusora, tolerante y acumuladora) para un mismo EPT en el caso de Sb y Pb (**Figura 2**). Debido a que una planta es capaz de presentar di-

versos grados de acumulación dependiendo del ecosistema en que se encuentre (Bavandpour *et al.*, 2018; Bonanno *et al.*, 2018). Estimamos que la alta variabilidad del Cu, Mn, Pb, V y Zn (Desviación estándar (DE)  $> 20$ ) frente al resto de EPT del suelo estudiado, en adición a otros factores que regulan la biodisponibilidad de estos EPT, tales como la capacidad de intercambio catiónico del suelo, los contenidos de las partículas de los sedimentos, salinidad, los DTPA (ácido dietiltri Aminopentaacético) de cada metal y del suelo, generarían este efecto de bioacumulación en *S. neei* (Torres & Johnson, 2001; Pérez *et al.*, 2006) (**Tabla 1**).

En Salinas de Pullaly, Chile, *S. neei* presenta un potencial alimenticio como fuente de minerales, fibra cruda y extracto libre de nitrógeno (NFE). Sin embargo, la concentración de Pb excede los límites máximos establecidos por el CA (Riquelme *et al.*, 2016). En Los Maitenes, Chile, *S. neei* presenta concentraciones de As, Cd y Pb que exceden los límites máximos establecidos por el CA (CA, 1995; Meza *et al.*, 2018). En este trabajo, se encontró que en el ACR Humedales de Ventanilla la concentración de As, Cd y Pb en el tallo de *S. neei* excedieron los límites establecidos por el CA al menos en dos zonas. Razón por la cual, también se propone la utilización de esta especie para fitorremediación por EPT (Meza *et al.*, 2018).

Las concentraciones de As en *S. neei* excedieron los límites máximos establecidos por el ECA en dos zonas (ZT<sub>2</sub> y ZR<sub>1</sub>). A valores de pH 6-8, el As se encuentra altamente ligado al calcio (Ca) (Peralta-Videoa *et al.*, 2009). En esta investigación encontramos que el pH del suelo superficial varía de 7,69 a 8,46. Debido a que el As ingresa a las células radicales vía transportadores de fosfato (Geng *et al.*, 2019), la competencia establecida entre el As y el P por el ingreso a las células radicales y la ligación con el serían factores limitantes en su absorción.

Las concentraciones de Cd en *S. neei* excedieron los niveles máximos establecidos por el CA en dos zonas (ZT<sub>3</sub> y ZS<sub>2</sub>). Algunos estudios mencionan que el Fe reduce la captación de Cd por la planta, el Ca es un fuerte inhibidor de la absorción de Cd por competencia iónica, el pH

es un factor clave en la bioacumulación de Cd, el incremento del pH reduce la movilidad y potencial disponibilidad del Cd, la presencia de grupos funcionales como carboxilos (RCOOH) y fenoles (ROH) en la materia orgánica forman complejos con Cd y reducen su transferencia en la planta, los suelos inundados pueden conducir a la transformación de Cd soluble en especies de sulfuro de cadmio (CdS) y esta transformación disminuye la solubilidad del Cd (Peralta-Videa *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). En este estudio no encontramos relación entre el Cd del suelo con el pH y el Fe; sin embargo, se estima que la interacción entre todos estos factores puede influir en los mecanismos de absorción de Cd por *S. neei*.

Las concentraciones de Pb en *S. neei* excedieron los niveles máximos establecidos por el CA, excepto en ZT<sub>1</sub> y ZR<sub>1</sub>. Respecto a los factores que limitan la absorción de este EPT por la planta, que la materia orgánica es capaz de formar quelatos solubles muy estables con el Pb (Cárdenas, 2012). Este elemento al no contar con canales para su absorción en la raíz se une a grupos carboxílicos de ácidos urónicos de mucílago en las superficies de las raíces (Peralta-Videa *et al.*, 2009). Además, Cortés-Páez *et al.* (2015) mencionan que existe un cierto orden de preferencia de absorción por la planta de EPT que varían según el pH y la materia orgánica del suelo. Debido a que el FB del Pb se correlaciona positivamente con los FB de Cu y Zn, la absorción de Pb por el tallo de *S. neei* se presume es afectada por el orden de preferencia de absorción de EPT.

## CONCLUSIONES

Los diferentes grados de impacto antrópico en las zonificaciones estudiadas no afectan la concentración de EPT en el suelo superficial del ACR Humedales de Ventanilla, Perú. Este suelo presenta una baja contaminación por EPT de acuerdo a los índices de contaminación simples e integrados analizados. El tallo de *S. neei* del ACR Humedales de Ventanilla presenta una gran variabilidad de estrategias de acumulación de EPT y potencial de fitorremediación de EPT. Se requiere continuar evaluando las

estrategias de bioacumulación de EPT en otras partes de la planta, como las raíces de *S. neei* en el ACR Humedales de Ventanilla, y analizar si en otros humedales costeros peruanos y del Pacífico Sur se presenta el mismo comportamiento ante los EPT que lo observado en el presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aponte, H & A Cano. 2013. Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú): Actualización y nuevos retos para su conservación. *Rev Latinoam conserv* 3(2):15-27.
- Bavandpour, F; Y Zou; Y He; T Saeed; Y Sun & G Sun. 2018. Removal of dissolved metals in wetland columns filled with shell grits and plant biomass. *Chem Eng J* 33:234-241.
- Bonanno, G; JA Borg & V Di Martino. 2017. Levels of potentially toxic elements in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: A comparative assessment. *Sci Total Environ* 576:796-806.
- Bonanno, G; J Vymazal & GL Cirelli. 2018. Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants. *Sci Total Environ* 631-632:252-261.
- Cárdenas, A. 2012. Presencia del Cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la cooperativa Agraria Industrial Naranjillo - Tingo María - Perú. Universidad Nacional Agraria de La Selva. Tingo María, Perú.
- CA (Codex Alimentarius). 1995. Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. *Codex Stan* 193-1995. Revisada en 1997, 2006, 2008, 2009 Enmendada en 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019.
- Chandra, R; S Yadav & S Yadav. 2017. Phytoextraction potential of potentially toxic elements by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. *Ecol Eng* 98:134-145.
- Chen, H; F Shu; S Yang; Y Li & S Wang. 2019. Competitive inhibitory effect of Calcium polypeptides on Cd enrichment of *Brassica campestris* L. *Int J Environ Res Public Health* 16:4472.
- Chui, HB; BT Miramira; PL Olivera & JH Jacay. 2009. Determinación de elementos potencialmente tóxicos en sedimentos del río Chillón mediante la técnica de fluorescencia de Rayos X. *Rev peru quím ing quím* 12(2):9-14.
- Cortés-Páez, LE; IS Bravo-Realpe; FJ Martín-Peinado & JC Menjivar-Flores. 2015. Adsorción de elementos potencialmente tóxicos en andisoles, vertisoles y ácidos húmicos. *Acta Agron* 64(1):61-71.

- Fajardo, N; HS Acosta & FG Villacres. 2017. Determinación de elementos potencialmente tóxicos en los cuerpos de agua del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla. *Rev Inst investig Fac minas metal cienc geogr* 20(39):149-158.
- Geng, N; Y Wu, Y; M Zhang; DCW Tsang; J Rinklebe & Y Xia. 2019. Bioaccumulation of potentially toxic elements by submerged plants and biofilms: A critical review. *Environ Int* 131:1-9.
- González-Alcaraz, MN; HM Conesa; M del Carmen-Tercero, R Schulin, J Álvarez-Rogel & C Egea. 2011. The combined use of liming and *Sarcocornia fruticosa* development for phytomanagement of salt marsh soils polluted by mine wastes. *J Hazard Mater* 186:805-813.
- GRC (Gobierno Regional del Callao). 2009. Plan Maestro 2009-2014. Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – SERNANP. Gobierno Regional Del Callao, Perú. 217 pp.
- GRC (Gobierno Regional del Callao). 2011. Plan de Desarrollo Concertado 2011-2021. Callao, Perú. pp. GRC (Gobierno Regional del Callao). 2011. 189 pp.
- Håkanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Res* 14:975-1001.
- Hou, Q; Z Yang; J Ji; T Yu; G Chen; J Li; X Xia; M Zhang & X Yuan. 2014. Annual net input fluxes of potentially toxic elements of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China. *J Geochem Explor* 139:68-84.
- Jara-Peña, E; J Gómez; H Montoya; T Sánchez; L Tapia; C Cano & A Dextre. 2017. Acumulación de elementos potencialmente tóxicos en *Calamagrostis rigida* (Kunth) Trin. ex Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum quitense* Kunth (Haloragaceae) evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa* 24:583-598.
- La Rosa, R; A Flores-Nuñez; M Chávez; G Flores; M Alcalde; H Zeña; L Arieta; N Valderrama; C Huerta & G Sandoval. 2020. Ecophysiology of *Sarcocornia neei* (Amaranthaceae) from two wetlands of the central coast of Lima, Peru. *Acta Bot Mex* 127:1-11.
- Li, K; C Cao; Y Ma; D Su & J Li. 2019. Identification of cadmium bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by the soil-plant transfer model and species sensitivity distribution. *Sci Total Environ* 692:1022-1028.
- Machado, A; N García; G García; L Acosta; A Córdova; M Linares; D Giraldoth & H Velásquez. 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev Int de Contam Ambient* 24(4):171-182.
- Meza, V; C Lillo; D Rivera; E Soto & R Figueroa. 2018. *Sarcocornia neei* as an indicator of environmental pollution: A comparative study in coastal wetlands of central Chile. *Plants* 7(3):1-9.
- MINAM. 2017a. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Diario Oficial El Peruano, 7 de junio del 2017, pp. 10-19.
- MINAM. 2017b. Decreto Supremo 011-2017-MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Diario Oficial El Peruano. 2 de diciembre del 2017, pp. 12-15.
- Nikalje, GC & P Suprasanna. 2018. Coping with metal toxicity – cues from halophytes. *Front Plant Sci* 9: 777.
- Peralta-Videa, JR; ML Lopez; M Narayan; G Saupe & J Gardea-Torresdey. 2009. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *Int J Biochem Cell B* 41(8-9):1665-1677.
- Pérez, M; G Martínez & I Fermín. 2006. Biodisponibilidad de metales traza en sedimentos superficiales del ecosistema lagunar costero Bocaripo-Chacopata (Península de Araya, Estado Sucre). *Bol Inst Oceanogr Venez* 45(2):81-91.
- Qingjie, G; D Jun; X Yunchuan; W Qingfei & Y Liqiang. 2008. Calculating pollution indices by potentially toxic elements in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *J China Univ Geosci* 19(3):230-241.
- Riquelme, J; JA Olaeta; L Gálvez; P Undurraga; C Fuentealba; A Osses; J Orellana; J Gallardo & R Pedreschi. 2016. Caracterización nutricional y funcional de *Sarcocornia neei* silvestre y cultivada presente en Chile. *Cienc investig agrar* 43(2):283-293.
- Rodríguez, N; M McLaughlin & D Pennock. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.
- Su, C; L Jiang & W Zhang. 2014. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environ skept crit* 3(2):24-38.
- Torres, KC & ML Johnson. 2001. Bioaccumulation of metals in plants, arthropods, and mice at a seasonal wetland. *Environ Toxicol Chem* 20(11): 2617-2626.
- Trujillo, K. 2013. Evaluación de la capacidad fitorremediadora de las plantas adaptadas al entorno del relave minero de la planta concentradora Santa Rosa de Jangas. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo [Ancash, Perú].
- USEPA. 2007. Method 7471B (SW-846): Mercury in solid or semisolid wastes (Manual Cold-Vapor Technique). Revision 2. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- USEPA. 1991. Method 200.3 Sample preparation procedure for spectrochemical determination of total recoverable elements in biological tissues. Environmental Protection

Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

USEPA. 1994. Method 200.7: Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. Revision 4.4. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

Vélez-Aspiazu, E & L Coello-Espinoza. 2017. Impactos ambientales producidos por la construcción de vivienda

a gran escala en la ciudad de Guayaquil. *Dominio de las Ciencias* 3(3):1066–1085.

Zagal, E & RA Sadzawka. 2007. Protocolo de métodos de análisis para suelo y lodos. Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo por encargo del Servicio Agrícola y Ganadero, Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía. Chillán. Chile.