



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN
Sarcocornia fruticosa (L.) A. J. SCOTT 1977 EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN
REGIONAL HUMEDALES DE VENTANILLA, REGIÓN CALLAO, PERÚ

Línea de investigación:

Ecotoxicología y química ambiental

Tesis para optar el título profesional de Licenciado en Biología

Autor:

Rosas Moloche, Joseph Luis

Asesor:

Iannacone Oliver, José Alberto
(ORCID: 0000-0003-3699-4732)

Jurado:

Castañeda Perez, Luz Genara
Lizárraga Travaglini, Alfonso Diulio
López Bulnes, Jorge Luis

Lima - Perú

2021

Referencia:

Rosas, J. (2021). *Evaluación de la bioacumulación de metales pesados en Sarcocornia fruticosa (L.) A. J. Scott 1977 en el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, región Callao, Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5400>



Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN *Sarcocornia fruticosa* (L.) A. J. SCOTT 1977 EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN REGIONAL

HUMEDALES DE VENTANILLA, REGIÓN CALLAO, PERÚ

Línea de investigación:

Ecotoxicología y química ambiental

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Biología

Autor:

Rosas Moloche, Joseph Luis

Asesor:

Iannacone Oliver, José Alberto

(ORCID: 0000-0003-3699-4732)

Jurado:

Castañeda Perez, Luz Genara

Lizárraga Travaglini, Alfonso Diulio

López Bulnes, Jorge Luis

Lima-Perú

2021

DEDICATORIA

A mis padres,
al tiempo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, a mis hermanos, a mi familia,
a mis amigos, Nick y Jessica,
a mi asesor José Iannacone,
a los técnicos de laboratorio.

ÍNDICE

I. Introducción	1
1.1. Descripción y formulación del problema	2
1.1. Antecedentes	3
1.3. Objetivos	5
- Objetivo general	5
- Objetivos específicos	6
1.4. Justificación	6
1.5. Hipótesis	7
II. Marco teórico	8
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación	8
2.1.1. Metales pesados	8
2.1.2. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo	9
2.1.3. Bioacumulación de metales pesados en plantas	9
2.1.4. Fitorremediación	9
2.1.5. Humedales	10
2.1.6. Áreas Naturales Protegidas	11
2.1.7. Área de Conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla	11
2.1.8. Zonificación del ACR Humedales de Ventanilla	12
2.1.8.1. Zona de Protección Estricta (PE)	12
2.1.8.2. Zona de uso silvestre (ZS)	12
2.1.8.3. Zona Turística (T)	13
2.1.8.4. Zona de Aprovechamiento Directo (AD)	14
2.1.8.5. Zona de Uso Especial (UE)	14
2.1.8.6. Zona de Recuperación (REC)	15
III. Método	16
3.1. Tipo de investigación	16
3.2. Ámbito temporal y espacial	16
3.3. Variables	16
3.3.1. Variables independientes	16
3.3.2. Variables dependientes	16
3.4. Población y muestra	17
3.5. Instrumentos	18
3.6. Procedimientos	18
3.6.1. Descripción de las zonas analizadas	18
3.6.1.1. Zona turística 1 (ZT1)	18
3.6.1.2. Zona turística 2 (ZT2)	18
3.6.1.3. Zona turística 3 (ZT3)	18
3.6.1.4. Zona de recuperación 1 (ZR1)	19
3.6.1.5. Zona de recuperación 2 (ZR2)	19
3.6.1.6. Zona de recuperación 3 (ZR3)	19
3.6.1.7. Zona de uso silvestre 1 (ZS1)	19
3.6.1.8. Zona de uso silvestre 2 (ZS2)	20
3.6.1.9. Zona de uso silvestre 3 (ZS3)	20
3.6.2. Obtención de la muestra	21
3.6.3. Análisis de la muestra	21
3.6.4. Parámetros fisicoquímicos del sustrato	22
3.6.4.1. Tratamiento general	22
3.6.4.2. Determinación de agua y sólidos totales	22
3.6.4.3. Análisis de pH	23
3.6.4.4. Conductividad eléctrica	23
3.6.4.1. Materia orgánica	24
3.7. Análisis de datos	25
3.7.1. Comparaciones en las concentraciones de metales pesados	25
3.7.2. Índices de contaminación del suelo	26
3.7.2.1. Factor de contaminación (Cfi)	26
3.7.2.2. Factor de riesgo ecológico (Eri)	27

3.7.2.3. Grado de contaminación(Cd).....	27
3.7.2.4. Índice de riesgo ecológico potencial (RI).....	28
3.7.2.5. Promedio de índice de contaminación (PI _{Avg}).....	28
3.7.2.6. Nuevo Índice de Contaminación (PIN).....	29
3.7.2.7. Índice de contaminación Nemerow (PI _{Nemerow}).....	29
3.7.2.8. Factor de Bioacumulación (FB).....	30
3.7.3. Procesamiento de datos.....	31
3.8. Consideraciones éticas.....	31
IV. RESULTADOS.....	33
4.1. Análisis fisicoquímicos del sustrato.....	33
4.1.1. Contenido de agua.....	33
4.1.2. pH.....	33
4.1.3. Conductividad eléctrica.....	33
4.1.4. Materia orgánica.....	33
4.2. Contenido de metales pesados del suelo superficial analizado.....	34
4.3. Contenido de metales pesados en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	35
4.4. Índices de contaminación del suelo.....	37
4.5. Bioacumulación de metales pesados en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	37
4.6. Análisis estadísticos.....	38
4.6.1. Análisis relacionados al contenido de metales pesados en el suelo.....	38
4.6.1.1. Prueba de normalidad para los parámetros fisicoquímicos del suelo.....	38
4.6.1.2. Prueba de normalidad para los metales pesados del suelo.....	39
4.6.1.3. Relación entre las zonificaciones por la concentración de metales pesados del suelo.....	39
4.6.2. Análisis relacionados al contenido de metales pesados en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	40
4.6.2.1. Prueba de normalidad para los metales pesados presentes en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	40
4.6.2.2. Relación entre las zonificaciones por las concentraciones de metales pesados en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	40
4.6.3. Análisis relacionados a los factores de bioacumulación de metales pesados en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	41
4.6.3.1. Prueba de normalidad para los metales pesados presentes en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	41
4.6.3.2. Relación entre las zonificaciones por los valores de bioacumulación del tallo de <i>S. fruticosa</i>	41
4.6.4. Interacción entre los parámetros fisicoquímicos y metales del suelo, la bioacumulación de metales pesados y la zonificación.....	42
4.6.4.1. Zonificación.....	42
4.6.4.2. Parámetros fisicoquímicos del suelo.....	42
4.6.4.2. Arsénico (As).....	42
4.6.4.3. Antimonio (Sb).....	42
4.6.4.4. Cadmio (Cd).....	43
4.6.4.5. Cobalto (Co).....	43
4.6.4.6. Cromo (Cr).....	43
4.6.4.7. Cobre (Cu).....	43
4.6.4.8. Hierro (Fe).....	44
4.6.4.9. Manganeseo (Mn).....	44
4.6.4.10. Mercurio (Hg).....	45
4.6.4.11. Níquel(Ni).....	45
4.6.4.12. Plomo(Pb).....	45
4.6.4.12. Selenio (Se).....	46
4.6.4.13. Vanadio (V).....	46
4.6.4.14. Zinc(Zn).....	46
V. Discusión de resultados.....	47
5.1. Fuentes de contaminación de metales pesados en el suelo del ACR Humedales de Ventanilla.....	47
5.2. Nivel de contaminación del suelo del ACR Humedales de Ventanilla.....	48
5.3. Parámetros fisicoquímicos del suelo del ACR Humedales de Ventanilla.....	49
5.4. Variación en la concentración de metales pesados del ACR Humedales de Ventanilla.....	51
VI. Conclusiones.....	56
VII. Recomendaciones.....	57
VIII. Referencias.....	58
IX. Anexos.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo aledaño a <i>S. fruticosa</i>	34
Tabla 2. Comparación de la concentración de metales pesados en suelo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) 2017.....	35
Tabla 3. Comparación de la concentración de metales pesados en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ del tallo de <i>S. fruticosa</i> con estándares de calidad.....	36
Tabla 4. Índices de contaminación del suelo del ACR Humedales de Ventanilla.....	37
Tabla 5. Clasificación de los valores de bioacumulación del tallo de <i>S. fruticosa</i>	38
Tabla 6. Prueba de normalidad para los parámetros fisicoquímicos analizados del suelo.....	39
Tabla 7. Prueba de normalidad para los metales pesados presentes en el suelo.....	39
Tabla 8. Test de normalidad para los metales pesados presentes en el tallo de <i>S. fruticosa</i>	40
Tabla 9. Test de normalidad para los factores de bioacumulación del tallo de <i>S. fruticosa</i>	41
Tabla 10. Valores de estadística básica de los metales pesados del suelo del ACR Humedales de Ventanilla.....	69
Tabla 11. Valores de estadística básica de los metales pesados del tallo de <i>S. fruticosa</i> del ACR Humedales de Ventanilla.....	70
Tabla 12. Valores de estadística básica de la bioacumulación del tallo de <i>S. fruticosa</i> del ACR Humedales de Ventanilla.....	71
Tabla 13. Correlación de Spearman's rs entre las variables analizadas en el ACR Humedales de Ventanilla....	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonificación del ACR Humedales de Ventanilla.....	17
Figura 2. Ubicación espacial de los puntos de muestreo.....	21
Figura 3. Dendrograma de similaridad de euclídeana con grupos pareados (PGMA) para MP del suelo proveniente del ACR Humedales de Ventanilla.....	39
Figura 4. Dendrograma de similaridad de euclídeana con grupos pareados (PGMA) para los metales pesados del tallo de <i>S. fruticosa</i>	40
Figura 5. Dendrograma de similaridad de euclídeana con grupos pareados (PGMA) para los factores de bioacumulación del tallo de <i>S. fruticosa</i>	41
Figura 6. Variación en las concentraciones de metales pesados en el suelo del ACR Humedales de Ventanilla ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).....	67
Figura 7. Distribución en barras del comportamiento de acumulación de metales pesados por parte del tallo de <i>S. fruticosa</i> del ACR Humedales de Ventanilla en número de ejemplares.....	68

Resumen

El objetivo del presente estudio fue evaluar la bioacumulación de metales pesados (MP) del tallo de *Sarcocornia fruticosa* (L.) A. J. Scott 1977 del Área de Conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. Se analizaron muestras del tallo de *S. fruticosa* y del suelo aledaño provenientes de tres zonas geográficas del humedal (ZT, ZS y REC), a fin de obtener sus concentraciones de MP y los parámetros fisicoquímicos del suelo (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y contenido de agua). Se realizaron comparaciones entre los estándares de calidad ambiental con las concentraciones de MP del suelo y del tallo de *S. fruticosa*, se efectuaron dendrogramas de similaridad euclídeana entre las zonificaciones según las concentraciones de MP en suelo, tallo de *S. fruticosa* y factores de bioacumulación (FB). Las concentraciones de MP en el suelo excedieron los valores de los estándares de calidad ambiental (ECA – suelo - Perú 2017) en dos zonas (ZT1 y ZS1); sin embargo, solo en ZT1 las concentraciones de MP en el tallo de *S. fruticosa* no excedieron los valores estándar del Codex Alimentarius. La zonificación del ACR Humedales de Ventanilla no se correlacionó con los MP en el suelo superficial, MP en *S. fruticosa* y los FB. Se concluye la zonificación del ACR no determina la concentración de MP en el suelo superficial y de acuerdo al consumo potencial de *S. fruticosa*, se encontró que excedió los niveles establecidos en As, Cd y Pb citados por el Codex Alimentarius, al menos en dos zonas.

Palabras clave: humedal, metales pesados, *Sarcocornia fruticosa*, suelo

Abstract

The objective of this study was to evaluate the bioaccumulation of heavy metals (HM) from the stem of *Sarcocornia fruticosa* (L.) A. J. Scott 1977 of the Area of Regional Conservation (ARC) Wetlands of Ventanilla, Callao Region, Peru. Samples of the *S. fruticosa* stem and the surrounding soil from three geographic areas of the wetland (ZT, ZS and REC) were analyzed, in order to obtain their HM concentrations and the physicochemical parameters of the soil (pH, electrical conductivity, organic matter and water content). Comparisons were made between environmental quality standards with the concentrations of HM of the soil and stem of *S. fruticosa*, dendrograms of Euclidean similarity were made between the zoning according to the concentrations of HM in soil, stem of *S. fruticosa* and bioaccumulation factors (BF). HM concentrations in the soil exceeded the values of environmental quality standards (EQS - soil - Peru 2017) in two zones (ZT1 and ZS1); however, only in ZT1 the HM concentrations in the stem of *S. fruticosa* did not exceed the standard values of the Codex Alimentarius. The zoning of the ARC Wetlands of Ventanilla was not correlated with the MP in the surface soil, MP in *S. fruticosa* and the BF. The zoning of the ARC is concluded does not determine the concentration of HM in the surface soil and in according to the potential consumption of *S. fruticosa* was found to exceed the levels established in As, Cd and Pb cited by the Codex Alimentarius, at least in two areas.

Keywords: wetland, heavy metals, *Sarcocornia fruticosa*, soil

I. Introducción

La contaminación por metales pesados ha despertado una creciente atención en todo el mundo debido a su ubicuidad, alta toxicidad, amplia gama de fuentes, persistencia, contaminación no degradable por procesos biológicos y comportamientos bioacumulativos en las cadenas alimentarias o redes alimentarias (Zhang et al., 2018).

Los humedales tienen un rol preponderante en la preservación de la calidad ambiental debido a su alta capacidad de retención y a la inactivación de sustancias nocivas (González-Alcaraz, Jiménez-Cárceles, Álvarez y Álvarez-Rogel, 2014), donde las macrófitas de los humedales desempeñan un papel fundamental en la geoquímica de este ecosistema porque son los principales acumuladores vivos de metales pesados a través de la absorción activa y pasiva (Bonanno, Vymazal y Cirelli, 2018). No obstante, existen pocos estudios referentes a la bioacumulación de metales pesados por plantas de humedales en el país.

Debido a su sistema radicular bien desarrollado, alta producción de biomasa, tolerancia a la toxicidad y a su naturaleza estacionaria (Bonanno et al., 2017; Bonanno et al., 2018), se propone aliviar la contaminación de metales pesados mediante procesos de fitoextracción y fitoestabilización (tipos de fitorremediación) (Wen et al., 2018), donde su papel directo se limita a la absorción de nutrientes y de metales pesados (Vymazal y Březinová, 2016). Resulta importante mencionar que el análisis integral de sedimento y de muestras biológicas permite una evaluación general de los metales pesados y su impacto en la vida acuática (Ramachandra, Sudarshan, Mahesh y Vinay, 2018). Sin embargo, niveles altos de metales en el ambiente también pueden afectar el comportamiento de bioacumulación y salud de las plantas debido a su ecotoxicidad.

Debido a que *Sarcocornia fruticosa* (L.) A. J. Scott 1977 es la especie dominante en la comunidad vegetal que ocupa mayor extensión en el ACR Humedales de Ventanilla. Por ende,

es la especie que se encuentra más expuesta a la contaminación por metales pesados y que además puede presentar un potencial alimenticio (Gobierno Regional del Callao [GRC], 2009; Patel, 2016). El objetivo de la presente investigación fue evaluar la bioacumulación de metales pesados del tallo de *S. fruticosa* del ACR Humedales de Ventanilla.

1.1. Descripción y formulación del problema

Los metales pesados en los humedales son considerados un importante problema debido a sus efectos destructivos sobre el balance ecológico, deterioro de la calidad del agua, decrecimiento de la diversidad y afectación de sus servicios ecosistémicos (Orimoloye, Kalumba, Mazinyo y Nel, 2018; Bonanno, Borg y Di Martino, 2017; Solgi y Galangashi, 2018), también por su alto potencial de ser absorbidos y bioacumulados en las cadenas o redes alimentarias (Esmaeilzadeh, Karbassi y Bastami, 2017; Zhang, Bai, Wang, Huang, Zhang y Wang, 2018). Estos metales pesados pueden ser transferidos al cuerpo humano mediante absorción, inhalación e ingestión por contacto dérmico, y luego pueden acumularse y representar una amenaza para la salud humana (Zhang et al., 2018; Sharma, Nagpal y Kaur, 2018).

Dentro del Área de Conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla se ha registrado la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua, donde los valores de plomo, mercurio y arsénico excedieron en algunos puntos de muestreo los valores permisibles según los estándares de calidad ambiental (ECA) 2015 según el D.S. N° 004-2015-MINAM) (Fajardo, Solís y Gil, 2017). Así mismo, el ACR Humedales de Ventanilla está comprendido por relictos de un humedal separado por carreteras, campos agrícolas y asentamientos humanos (Aponte y Ramírez, 2014). Razón por la cual, la presencia de metales pesados en el humedal implica un gran riesgo para la flora y fauna del lugar y para los habitantes que habitan en zonas aledañas al ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

1.1. Antecedentes

Zayed, Gowthaman y Terry (1998), estudiaron la bioacumulación de *Lemna minor* L. “lenteja de agua” de metales pesados (Cu, Se, Pb, Cd, Ni y Cr) bajo distintas concentraciones de cada elemento de manera individual. La lenteja de agua demostró ser un buen acumulador de Cd, Se y Cu, un acumulador moderado de Cr, y un pobre acumulador de Ni y Pb.

Kara (2005), registró el comportamiento de bioacumulación de *Nasturtium officinale* R.Br. de metales pesados (Cu, Zn y Ni) en periodos de tiempos distintos, siendo capaz de acumular durante los primeros días altos niveles de Cu y Zn, pero niveles bajos de Ni, mostrando una tendencia a disminuir la concentración de estos elementos en la planta a medida que pasaron los días.

Zhang et al. (2018), estudiaron la capacidad de bioacumulación y el factor de traslocación de metales pesados en *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. y *Suaeda heteroptera* Pall. en dos tipos de humedales (marinos y temporales) en China, hallando una tendencia a una acumulación mayor por parte de las raíces respecto a hojas y tallos, además que el tipo de humedal también afectaba la capacidad de bioacumulación y el factor de transferencia para cada metal estudiado (As, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn).

Yang et al. (2017), estudiaron la bioacumulación de metales pesados (Pb, Zn y Cd) en humedales con regímenes hidrológicos diferentes, mostrando que la captura de metales (Pb, Zn y Cd) y la formación de placas de Fe sobre la superficie de las raíces en la rizósfera de las plantas de humedales son remarcablemente más altas en condiciones de inundación que bajo condiciones de no inundación.

Bonanno et al. (2017), investigaron los niveles de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn en pastos marinos y macrófitas de humedales (entre los que se encuentran especies de humedales costeros peruanos como *P. australis*, *Arundo donax* L., *Typha domingensis* Pers. y

N. officinale, demostrando que la capacidad de bioacumulación de sedimentos, traslocación, niveles totales en tejidos de plantas, y bioindicación de metales en suelos son generalmente específicos de cada especie.

Peña et al. (2017) durante un estudio en cuatro humedales altoandinos distribuidos entre la región Pasco y la región Lima reportaron valores de bioacumulación menores a 1 para cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) y en mayor concentración en las raíces, en ejemplares de *Calamagrostis rigida* (Kunth) Trin. ex Steud. y *Myriophyllum quitense* Kunth.

Ruíz, Rodríguez y Ipanaqué (2013) reportaron la presencia de metales pesados (Pb, Cd, Hg y As) en “junco”, “enea” y “totora” del humedal Puerto Viejo, tomando en cuenta que la mayoría de metales pesados sobrepasaron los valores para aguas destinadas a la conservación del medio ambiente acuático (estuarios) para los casos el plomo (estándar de $0,0081 \text{ mg} \square \text{L}^{-1}$), el cadmio (estándar de $0,005 \text{ mg} \square \text{L}^{-1}$), el mercurio (estándar de $0,001 \text{ mg} \square \text{L}^{-1}$) y el arsénico (estándar de $0,05 \text{ mg} \square \text{L}^{-1}$); establecidos por el DS N° 002-2008- MINAM.

Bonanno et al. (2018), hallaron valores de bioacumulación de 1,38 y 1,11 para Cd y Hg, respectivamente; en *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla., valores de 1,38 para Cd y 1,29 para Hg de *T. domingensis*. Encontrando que los mayores niveles de acumulación de metales pesados se encuentran en la raíz, respecto al resto de los órganos, lo mismo que se repite en otros estudios (Bavandpour et al., 2018; Bonanno et al., 2017).

Vale acotar que *P. australis* es la macrófita de humedales más utilizada en humedales artificiales y quizá la más estudiada (presenta valores de bioacumulación de metales pesados bastante variables y que se acumulan principalmente en las raíces (Khan et al., 2009; Vymazal & Březinová, 2016; Bonanno et al., 2017; Bonanno et al., 2018, Zhang et al., 2018). Ello refiere también a la variabilidad de valores de bioacumulación dependiente de la ubicación geográfica y las condiciones del ambiente para la misma especie.

Las salicornias son comunes en ecosistemas salinos, comprendiendo lagos salinos, lagunas, y áreas costeras que se encuentra expuestas a regímenes mareales (submareales, intermareales y supramareales) (Marasco et al., 2016). Además, las especies de salicornia presentan potencial alimenticio y medicinal (Patel, 2016), pueden ser cultivadas en áreas de interés insignificante para agricultura y tienen grandes potenciales de fitorremediación de efluentes de maricultura (Marasco *et al.*, 2016) y de suelos salinos (González et al., 2011; Marasco et al., 2016; Idaszkin et al., 2017). Asimismo, Riquelme et al. (2016) reporta la presencia de metales pesados como Pb, Cd y As en ejemplares de *S. neei* provenientes de las Salinas de Pullally en Valparaíso, Chile.

S. fruticosa se encuentra grandemente distribuida en la gradiente mareal, expuesta a alta salinidad del suelo, alta cobertura vegetal e inundaciones menos frecuentes (Redondo et al., 2004). Su importancia reside en que, esta especie compone la comunidad vegetal salicornial del ACR Humedales de Ventanilla, la cual es la más extensa respecto al resto (79,3 ha) correspondiendo al 25,4% del área total del humedal (GRC, 2009).

Cabe resaltar que el hecho que una planta sea nativa es un factor importante en temas de fitorremediación porque estas especies suelen ser mejores en tema de supervivencia, crecimiento y reproducción bajo estrés ambiental que las plantas introducidas de otros ambientes (Tripathi y Misra, 2013), y además Aponte y Ramírez (2014), reportan a la especie *S. fruticosa* como una planta nativa para el ACR Humedales de Ventanilla.

1.3. Objetivos

- *Objetivo general*

- Evaluar la bioacumulación de metales pesados en *S. fruticosa* en el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú.

- *Objetivos específicos*

- Obtener los valores de bioacumulación de metales pesados del tallo en los ejemplares de *S. fruticosa*.
- Observar si la zonificación del ACR Humedales de Ventanilla determina la concentración de metales pesados en el suelo, metales pesados en el tallo de *S. fruticosa* y la bioacumulación de estos metales pesados.
- Analizar la relación de correspondencia entre los parámetros fisicoquímicos del suelo y los factores de bioacumulación de los distintos metales pesados hallados en los ejemplares de *S. fruticosa* entre las distintas zonas evaluadas.
- Analizar la relación de correspondencia entre los metales pesados en el suelo y los factores de bioacumulación de los distintos metales pesados hallados en los ejemplares de *S. fruticosa* entre las distintas zonas evaluadas.

1.4. Justificación

Los ejemplares de *S. fruticosa* (reportada como *Sarcocornia neei* (Lag.) M.A. Alonso & M. B. Crespo en el estudio) se encuentran distribuidos a lo largo de toda la cadena de los humedales costeros de la región (Aponte y Cano, 2013). Por ende, este estudio brindará información de cómo se comportarían los humedales costeros frente a la contaminación por metales pesados. Donde también ha sido comprobada su presencia en un miembro de este corredor como el humedal el Paraíso (Ruíz et al., 2013).

También se podrían establecer patrones de absorción de metales pesados en la planta dependiente de los niveles de cada uno en el suelo y posiblemente su respectiva posición geográfica en el humedal.

1.5. Hipótesis

Sarcocornia fruticosa en el ACR Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú, presenta mayores valores de bioacumulación de metales pesados, con diferencias significativas, entre la zona de recuperación respecto a la zona de uso turístico y silvestre, debido a que la zona de recuperación limita con la zona de uso especial (área abarcada por la Cooperativa Apurímac) y el AAHH Valle Verde.

II. Marco teórico

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. Metales pesados

Según Oyuela et al. (2017) desde una perspectiva química, MP (metales pesados) son metales de transición con una masa atómica mayor a 0,002 Kg y un peso específico mayor a 5 $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$, además biológicamente hablando, "pesado" describe una serie de metales, en algunos casos metaloides, que incluso en bajas concentraciones pueden ser tóxicos para plantas y animales.

Ramachandra et al. (2018) menciona que entre estos elementos se incluye As, Cd, Cr, Cu, Co, Hg, Pb, Fe; Mn, Ni y Zn. Además, otras fuentes incluyen al St, Se y V (Su, Jiang, & Zhang., 2014; Ministerio de Industria Comercio y Turismo [MICT], 2017).

Los MP pueden ser agrupados en dos categorías: esenciales y no esenciales. Los metales esenciales o micronutrientes, como el Cr, Co, Cu, Mn, Mo, Fe, Se y Zn, son necesarios para el óptimo funcionamiento de los procesos biológicos y bioquímicos en los organismos (incluyendo humanos) que incluyen reacciones redox y formación de pigmentos y enzimas (Bonanno et al., 2017).

En cambio, los metales no esenciales, como el As (metaloide, específicamente hablando), Cd, Hg, y Pb, no tienen función biológica conocida y ejercen su toxicidad compitiendo con elementos esenciales para sitios activos de enzimas o proteínas de membrana (Bonanno et al., 2017; Torres et al., 2008). Sin embargo, los metales esenciales también pueden tener efectos perjudiciales para las especies y ecosistemas completos cuando están expuestos a altos niveles (Bonanno et al., 2017; Nagajyoti et al., 2010) y a diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados generalmente no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales (Phillips, Human y Adams, 2015).

2.1.2. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo

Varias condiciones que afectan la concentración de metales pesados, por ejemplo: la movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad, dentro de ello, son consideradas las características del suelo, naturaleza de la contaminación y las condiciones medio ambientales. Así también, un factor importante que gobierna la movilidad, toxicidad y biodisponibilidad de los metales pesados es su especiación: estado, fase/s o forma/s química/s en que se encuentra un determinado elemento en el suelo (Solano, 2005), otro elemento a tomar en cuenta es la relación entre los metales pesados sobre la bioacumulación de los mismos por la planta (Peralta-Videa et al., 2009).

2.1.3. Bioacumulación de metales pesados en plantas

En general la acumulación de metales pesados por macrófitas depende de la capacidad de tomarlos y transportarlos intracelularmente en la planta y envuelve pasos importantes como a) movilización en la rizósfera, b) transporte del metal a través de la membrana plasmática de las células radicales, c) carga y desplazamiento por el xilema, y d) desintoxicación y secuestro de metales pesados por toda la planta y niveles celulares (Vymazal & Březinová, 2016). Diversos estudios reportan que la mayor cantidad de metales pesados en las plantas se acumulan en las raíces (Zhang et al., 2018; Bonanno et al., 2018; Bavandpour et al., 2018).

2.1.4. Fitorremediación

La bioacumulación es un aumento en la concentración del producto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo en comparación a la concentración de dicho producto químico en el ambiente (Prieto, Gonzáles, Román & Prieto, 2009). La fitorremediación se basa en ello, y utiliza la capacidad de ciertas plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos, tales como metales pesados (Delgadillo-López, Gonzáles- Ramirez,

Prieto-García, Villagómez-Ramírez y Acevedo-Sandoval, 2011).

En la fitorremediación se identifican varios tipos de procesos de remediación que varían según las partes de la planta que participan o los microorganismos que contribuyen con la degradación de los contaminantes, algunos de ellos son: fitoextracción, rizofiltración, fitoestabilización, fitoestimulación, fitovolatilización o fitodegradación (Arias, Betancur, Gómez, Salazar y Hernández, 2010).

2.1.5. Humedales

Según la convención Ramsar (1971) los humedales son áreas de marismas, pantanos, turberas o aguas, ya sean naturales o artificiales, permanentes o temporales, con agua estática o fluyendo, fresca, salobre o salada, incluidas las áreas marinas cuyas aguas en marea baja no exceda los 6 m de profundidad (Ramsar Convention, 1971).

Los humedales son generalmente definidos como áreas de interface entre ecosistemas terrestres y acuáticos, además son ambientes ricos en biodiversidad y altos en productividad que exportan grandes cantidades de nutrientes del medio marino. Asimismo, fungen como zonas de desove, desarrollo y reclutamiento de invertebrados y peces, zonas de anidación para aves (Danemann & Ezcurra, 2007) y ofrecen servicios ambientales como el control de la erosión costera e inundaciones, la producción de recursos pesqueros, y como atractivo turístico (Ramsar Convention Secretariat, 2004).

Sin embargo, también son ecosistemas sensibles y frágiles (Bassi et al., 2014; Zhang, Bai, Zhao, Jia y Wen, 2016) y los humedales costeros son particularmente vulnerables a la presencia de metales pesados (Bonanno et al., 2017). Pudiendo ser afectados por metales pesados por dos vías. En los sistemas naturales, los metales pesados se originan a partir de rocas, minerales, volcanes y la liberación de metales durante la erosión, lo que lleva a la formación de suelos (Bonanno et al., 2017), mientras que antropogénicamente debido a las

aguas residuales, descargas de fuentes municipales, industriales y agrícolas, drenaje superficial de minas, flujos de retorno de riego, descargas de aguas pluviales urbanas, lixiviados, pesticidas químicos y fertilizantes agrícolas, además de otras fuentes de contaminación (Zhang et al., 2017; Sharma y Nagpal, 2018).

2.1.6. Áreas Naturales Protegidas

En el Perú se diferencian dos grandes grupos de ANP: las áreas de uso indirecto y las áreas de uso directo. Es importante resaltar que las ACR son de uso directo lo cual significa que en ellas se permite el aprovechamiento y la extracción de recursos naturales siempre y cuando los usos y actividades que se desarrollen sean compatibles con los objetivos de la creación del área (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2013).

Se establecen principalmente para conservar la diversidad biológica de interés regional y local, y mantener la continuidad de los procesos ecológicos esenciales y la prestación de los servicios ambientales que de ellos deriven. Además, estos espacios pueden conservar valores asociados de interés cultural, paisajístico y científico, contribuyendo a fortalecer la identidad cultural del poblador en relación a su entorno, proteger zonas de agrobiodiversidad, promover actividades compatibles con los objetivos de conservación como la educación ambiental, la investigación aplicada y el turismo sostenible, entre otras (MINAM, 2009).

2.1.7. Área de Conservación Regional (ACR) Humedales de Ventanilla

El ACR Humedales de Ventanilla es un humedal cuyo afluente principal es el río Chillón, fundado el 20 de diciembre del 2006, se encuentra catalogada como área de uso directo (GRC, 2009). El cual presenta una baja similitud de Jaccard respecto a otros humedales costeros de la región lima en cuanto a composición florística (0,16 a 0,464), siendo un aporte al aumento de la diversidad beta de este corredor (Aponte y Ramírez, 2014).

2.1.8. Zonificación del ACR Humedales de Ventanilla

Según el plan maestro 2009-2014 del ACR Humedales de Ventanilla (GRC, 2009):

2.1.8.1. Zona de Protección Estricta (PE). Se define como aquellos espacios donde los ecosistemas han sido pocos o nada intervenidos, o incluyen lugares con especies o ecosistemas únicos, raros o frágiles, los que, para mantener sus valores, requieren estar libres de la influencia de factores ajenos a los procesos naturales mismos, debiendo mantenerse las características y calidad del ambiente original (GRC, 2009). En esta zona sólo se permiten actividades propias del manejo del área y de monitoreo del ambiente, y excepcionalmente, la investigación científica (GRC, 2009).

Esta zona ocupa el cuerpo de agua ubicado al oeste del ACR, en el área ocupada por los salicorniales. Esta zona abarca 2,93 ha, que representan un 0,94 % del área del área. En este cuerpo de agua se registraron los dos únicos individuos de la especie *Phoenicopterus chilensis* Molina, 1782 (flamencos) que han visitado el área durante ocho meses del año 2008 y los años posteriores (Carazas et al., 2016). Cabe señalar que estos cuerpos de agua tienen un alto contenido de sales, por lo que favorecen el desarrollo de especies que constituyen el alimento de *P. chilensis*, como crustáceos, moluscos y algas (GRC, 2009).

Esta zona tiene por objetivo mantener las características ecológicas de estos cuerpos de agua especiales, con la finalidad de que los individuos de *P. chilensis*, así como de otras aves migratorias de importancia, usen el área para su alimentación y descanso (GRC, 2009).

2.1.8.2. Zona de uso silvestre (ZS). Se refiere a las zonas que han sufrido poca o nula intervención humana y en las que predomina el carácter silvestre; pero que son menos vulnerables que las áreas incluidas en la Zona de Protección Estricta. En estas zonas es posible, además de las actividades de administración y control, la investigación científica, educación y la recreación sin infraestructura permanente ni vehículos motorizados (GRC, 2009).

La Zona de uso Silvestre (ZS) ocupa la mayor parte del ACR Humedales de Ventanilla, y se identifican dos sectores. El primer sector se ubica en la zona central del área, y abarca hasta el límite este (Balneario Costa Azul). Se constituye por hábitats de juncos y de salicornias (GRC, 2009). El segundo sector está al sureste del ACR Humedales de Ventanilla, y se caracteriza por ser la zona desértica con las cadenas de montañas que forman parte del límite sur del área (GRC, 2009).

En total, la Zona Silvestre abarca 137,42 ha, que representan un 44,01 % del área. Los objetos de conservación identificados son: salicorniales, aves migratorias y aves residentes. Esta zona es empleada por las aves como lugar de alimentación, descanso, refugio y anidación (GRC, 2009).

2.1.8.3. Zona Turística (T). Son espacios que tiene rasgos paisajísticos atractivos para los visitantes y que, por su naturaleza, permiten un uso recreativo compatible con los objetivos del área. En estas zonas se permite el desarrollo de actividades educativas y de investigación, así como infraestructura de servicios necesarios para el acceso, estadía y disfrute de los visitantes, incluyendo rutas de acceso carrozable, albergues y uso de vehículos motorizados (GRC, 2009).

Esta área cuenta con cuatro sectores, el primer sector se ubica en la zona norte del área, y coincide con los límites del ACR Humedales de Ventanilla. En este sector se ubica la infraestructura básica para la administración del área, como es el Módulo Administrativo, Centro de Interpretación, entre otros. El segundo sector, también al norte, se encuentra rodeado por la Zona de Aprovechamiento Directo, y contiene la zona de mayor uso turístico recreativo, como es la denominada Pisciplaya (GRC, 2009).

Los sectores tercero y cuarto se encuentran ubicados al sur del área. Estos sectores son usados por algunos grupos de visitantes y turistas que desean conocer las formaciones

geológicas y cuevas del área. La diferencia entre estos sectores radica en la intensidad de uso de parte de los visitantes (GRC, 2009).

La Zona de Uso Turístico y Recreativo ocupa 82,93 ha, que representan un 26,56 % del área del ACR. Tiene como objetivo permitir el turismo y la recreación, ofreciendo a los visitantes las condiciones adecuadas para facilitar el acceso y su seguridad y sin poner en riesgo los objetivos de conservación del área (GRC, 2009).

2.1.8.4. Zona de Aprovechamiento Directo (AD). Son espacios previstos para llevar a cabo la utilización directa de flora o fauna silvestre, incluyendo la pesca, en las categorías de manejo que contempla tales usos y según las condiciones especificadas. Se permiten actividades para la educación, investigación y recreación (GRC, 2009).

Esta área se encuentra al noreste del ACR Humedales de Ventanilla, y se encuentra rodeando cuerpos de agua, entre los que destaca la zona recreativa denominada Pisciplaya. Los recursos que aquí se aprovechan corresponden a dos objetos de conservación, totorales y juncuales. Esta zona tiene una extensión de 15 ha, que representan un 4,8 % del área (GRC, 2009).

Esta zona es empleada por las aves como lugar de alimentación, descanso, refugio y anidación (GRC, 2009). Esta zona tiene por objetivo permitir el aprovechamiento de los recursos naturales totora y junco, por los pobladores aledaños asentados en los alrededores del ACR Humedales de Ventanilla, bajo planes de manejo aprobados por la autoridad competente, y llevados a cabo por la población beneficiaria (GRC, 2009).

2.1.8.5. Zona de Uso Especial (UE). Se refiere a los espacios ocupados por asentamientos humanos preexistentes al establecimiento del área natural protegida, o en los que, por situaciones especiales, ocurre algún tipo de uso agrícola, pecuario, agrosilvopastoril u otras actividades que implican la transformación del ecosistema original (GRC, 2009).

Para el ACR Humedales de Ventanilla, la Zona de Uso Especial (ZUE) se encuentra al norte del área, y comprende el área ocupada por la Asociación Cultural Los Chankas y la Asociación del Proyecto Ecoturístico Apurímac, respetando así los derechos preexistentes al establecimiento del área. Esta zona tiene una extensión de 6,03 ha, que representan un 1,93 % del área del ACR (GRC, 2009).

Esta zona tiene por objetivo controlar y monitorear las actividades agrícolas y pecuarias sin que superen las capacidades del recurso suelo (GRC, 2009).

2.1.8.6. Zona de Recuperación (REC). Zona de carácter transitorio, aplicable a ámbitos que por causa naturales o intervención humana, han sufrido daños importantes y requieren un manejo especial para recuperar su calidad y estabilidad ambiental, de manera que luego pueda asignársele una zonificación que corresponde a su naturaleza (GRC, 2009).

Esta área cuenta con 2 sectores. El primer sector se ubica al norte del área, colindando con las áreas ocupadas por la Asociación Cultural Los Chankas y la Asociación del Proyecto Ecoturístico Apurímac y llega hasta las áreas ocupadas por el AAHH Valle Verde. Esta zona se presenta debido a los problemas que han ocurrido y que han llevado a alteraciones del ecosistema como son el fraccionamiento del hábitat, y alteración de los procesos que en él suceden (GRC, 2009).

El sector 2 de esta zona se ubica al extremo sur este del área, y comprende las zonas de influencia marina que constantemente se encuentran sometidas a la dispersión de basura y residuos contaminantes por el mar y por los vientos (GRC, 2009). Esta zona ocupa 67,94 ha, que representan un 21,76 % del área del ACR, y tiene por objetivo detener el deterioro de áreas, así como reconstituir los ecosistemas ya degradados que se dan en estos sitios, con la finalidad de que vuelvan a cumplir sus funciones ecológicas (GRC, 2009).

III. Método

3.1. Tipo de investigación

El estudio comprende un diseño no experimental de tipo transversal.

3.2. Ámbito temporal y espacial

El estudio fue realizado en la zona de recuperación, silvestre y de uso turístico pertenecientes al ACR Humedales de Ventanilla, el cual se encuentra localizado en el siguiente rango de coordenadas UTM (8683000N 265000E hasta 8688000N 268200E) referidas al elipsoide WGS 84, Zona 18. De acuerdo al D.S. N° 074-2006-AG presenta una superficie de 275,45 ha, limitando al norte con la Av. La Playa, por el sur con zonas circundantes de estribaciones finales de los cerros Colinar y Los Perros, por el este con el asentamiento humano Defensores de la Patria, así como con los terrenos de granjas avícolas, y al oeste con el mar (GRC, 2009).

3.3. Variables

3.3.1. Variables independientes

- pH.
- Conductividad eléctrica (σ)
- Contenido de materia orgánica (SOM) del suelo (%)
- Contenido de metales pesados en suelo ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

3.3.2. Variables dependientes

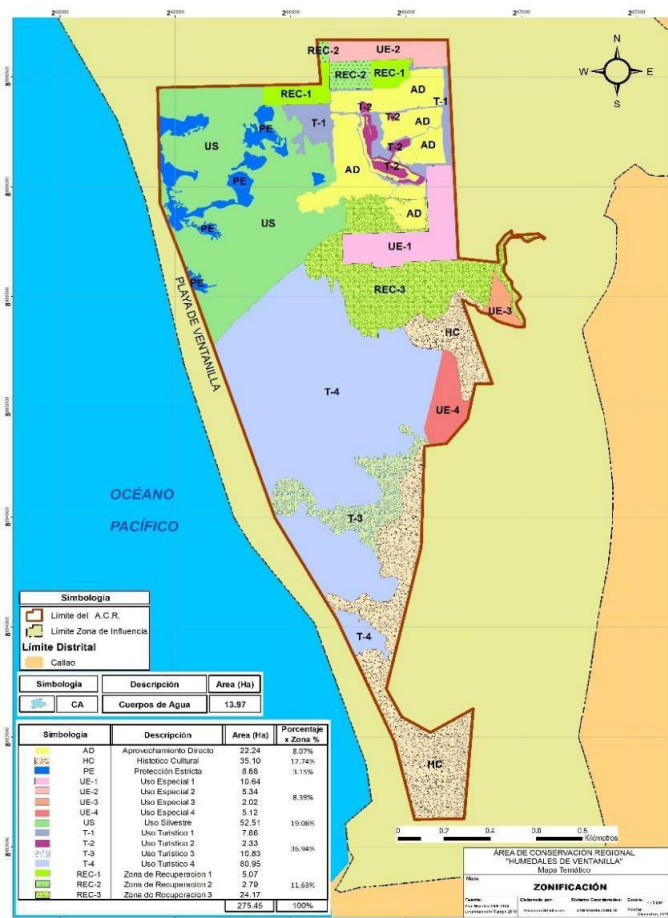
- Contenido de metales pesados en planta ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- Bioacumulación de metales pesados de la planta

3.4. Población y muestra

La población corresponde a todos los ejemplares de *S. fruticosa* que se encuentran ubicados dentro de las diversas comunidades vegetales del ACR Humedales de Ventanilla, mientras que la muestra de estudio corresponderá a 9 individuos completos de *S. fruticosa* comprendidos en 500 g, cada uno. Se establecerán para ello 3 puntos de muestreo por cada zona del humedal: zona de uso silvestre, zona de uso turístico y la zona de recuperación; respectivamente.

Figura 1

Zonificación del ACR Humedales de Ventanilla. AD=Zona de Aprovechamiento Directo, T=Zona Turística, REC=Zona de Recuperación. ZS=Zona de Uso Silvestre, UE=Zona de Uso Especial, PE=Zona de Protección Estricta. Proporcionado por la Jefatura del ACR Humedales de Ventanilla.



3.5. Instrumentos

Se utilizaron la información de Aponte y Ramírez (2014) para la identificación de la especie vegetal utilizada en el estudio.

3.6. Procedimientos

3.6.1. Descripción de las zonas analizadas

Entre las zonas de muestreo ubicadas en el ACR Humedales de Ventanilla se pueden encontrar ciertas diferencias observables, que se detallan a continuación:

3.6.1.1. Zona turística 1 (ZT1). Ubicado en la zona noreste del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra dentro de una comunidad vegetal juncal, aledaña al inicio del sendero turístico denominado sendero junco.

Presenta un nivel bajo de tránsito, utilizado mayormente para actividades de avistamiento de aves. Se observa que la zona ha sido utilizada para arrojamiento de desmonte en el pasado debido a la presencia de rocas y restos de ladrillos que se extrajeron al momento de la obtención de la muestra de suelo. Entre las aves más representativas que se observan cerca podemos encontrar al *Passer domesticus* Linnaeus, 1758, *Columba livia* Gmelin, 1789 y *Zenaida meloda* Tschudi, 1843.

3.6.1.2. Zona turística 2 (ZT2). Ubicado en la zona noreste del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra en el sector humedales, aledaña a la comunidad vegetal juncal, al sendero turístico denominado sendero aves y a un gran espejo de agua denominado espejo central. La zona presenta un nivel alto de tránsito de visitantes por encontrarse en el recorrido turístico. Entre las aves más representativas que se pueden encontrar cerca están *Spatula cyanoptera* Vieillot, 1816, *Butoroides striata* Linnaeus, 1758 e *Himantopus mexicanus* Müller, 1776.

3.6.1.3. Zona turística 3 (ZT3). Ubicado en la zona sureste del ACR Humedales de

Ventanilla, se encuentra en el sector cuevas, dentro de la comunidad vegetal salicornial, aldeaño a una avícola y al “cerro lagarto”. Se presume que la zona no es muy transitada por no haberse encontrado huellas y que además no se encuentra en el recorrido que va en dirección a las cuevas o la playa. Casualmente cerca al punto de muestreo se pueden observar aves como *Burhinus superciliaris* Schudi, 1843, *Coragyps atratus* Bechstein, 1793 y *Athene cunicularia* Molina, 1782.

3.6.1.4. Zona de recuperación 1 (ZR1). Ubicado en la zona noreste del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra en el sector humedales, dentro de la comunidad vegetal salicornial mixto y aldeaño a un canal de agua. La zona presenta continuo tránsito de animales de granja (*Equus ferus* Linnaeus, 1758 y *Ovis o. aries* Linnaeus, 1758) con gran presencia de excretas. Entre las aves más representativas que se pueden avistar cerca tenemos al *Charadrius vociferus* Linnaeus, 1758, *Crotophaga sulcirostris* Swainson, 1827 y *Pirrocephalus rubinus* Boddaert, 1783.

3.6.1.5. Zona de recuperación 2 (ZR2). Ubicado en la zona central del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra dentro del sector humedales en la comunidad vegetal salicornial aldeaña al Asentamiento Humano Valle Verde. La zona presentaba continuo tránsito de los pobladores del asentamiento humano que ingresaban de manera ilegal al humedal. Casualmente cerca al punto de muestreo se puede observar *C. vocíferus*.

3.6.1.6. Zona de recuperación 3 (ZR3). Ubicado en la zona central del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra en el sector humedales, en un parche de salicornias al interior de los restos del asentamiento humano Proceres. La zona no presenta continuo tránsito debido a que no se encuentra en el recorrido turístico. Casualmente cerca al punto de muestreo se pueden observar aves como *B. superciliaris*, *C. atratus* y *A. cunicularia*.

3.6.1.7. Zona de uso silvestre 1 (ZS1). Ubicado en la zona central del ACR Humedales

de Ventanilla, se encuentra en el sector humedales, dentro de la comunidad vegetal salicornial alledaña al Asentamiento Humano Valle Verde. La zona presenta bajo tránsito de la población que se dirige hacia la playa dado que no se encuentra en el recorrido turístico. Casualmente cerca al punto de muestreo se pueden observar aves como *C. livia*, *F. sparverius* Linnaeus, 1758 e *H. mexicanus*.

3.6.1.8. Zona de uso silvestre 2 (ZS2). Ubicado en la zona oeste del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra en el sector humedales, dentro de la comunidad vegetal salicornial, alledaña a la laguna de mayor extensión del humedal y donde se avistan la mayor cantidad de aves del humedal. La zona presenta bajo nivel de tránsito, se compone principalmente por transeúntes que caminan en dirección a la playa. Se presume que la zona era utilizada para el arrojamiento de material de construcción debido a que a la hora de la extracción de la muestra se encontró que el suelo estaba compuesto fundamentalmente por “canto rodado”. Principalmente se observan aves como *Chroicocephalus cirrocephalus* Vieillot, 1818, *H. mexicanus* y *Phalacrocorax brasilianus* Gmelin, 1789.

3.6.1.9. Zona de uso silvestre 3 (ZS3). Ubicado en la zona suroeste del ACR Humedales de Ventanilla, se encuentra en el sector humedales, dentro de la comunidad vegetal salicornial, cercana al límite con el sector cuevas. La zona presenta un nivel bajo de tránsito, se compone principalmente por transeúntes que caminan en dirección a las cuevas. Casualmente se observan aves como *H. mexicanus*.

Figura 2

Ubicación espacial de los puntos de muestreo. Extraído de Google Earth Pro 2019.



3.6.2. Obtención de la muestra

Las muestras de sedimentos y macrófitas fueron recolectadas por un muestreo aleatorio en las regiones accesibles de las zonas analizadas por medio de un generador de números aleatorios, ubicados en el mapa y contrastados en campo. Por punto de muestreo se extrajeron 500 g de macrófitas enteras, sin daño mecánico por plagas o enfermedades y fueron almacenadas en bolsas de polietileno.

Adicionalmente, se extrajeron 500 g de sustratos aledaños (0 a 10 cm de profundidad) para el análisis de la concentración de metales pesados y otros 500 g para los análisis fisicoquímicos.

Todas las muestras fueron preservadas a 4°C hasta la realización de los análisis respectivos.

3.6.3. Análisis de la muestra

Los análisis de MP totales se realizaron según el método de Espectrometría de Masas con Plasma acoplado inductivamente (ICP – MS). Para los análisis de metales pesados en suelo se siguieron los parámetros establecidos por EPA

200.7 para determinación de elementos traza en aguas y lodos. Mientras que para los análisis de concentración de metales pesados en los tallos de plantas se siguió lo establecido por el EPA 200.3 para recolección de metales totales en tejidos biológicos.

3.6.4. Parámetros fisicoquímicos del sustrato

Se realizaron las mediciones analíticas siguiendo lo estipulado por el protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos (Zagal & Sadzawka, 2007).

3.6.4.1. Tratamiento general.

1. Se homogenizó la muestra del terreno, disgregando los terrones manualmente eliminando las piedras y los residuos vegetales de mayor tamaño tales como raíces gruesas.
2. Se separó una fracción de al menos 500 g de la muestra, luego se esparció sobre una bandeja y cubrió con una lámina de plástico. El espesor de la capa no excedió los 15 mm.
3. La muestra fue secada en una estufa a una temperatura no mayor a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ o al aire, hasta que la pérdida de masa no fue mayor del 5% en 24 h.
4. La muestra fue tamizada a través de un tamiz de 2 mm, los terrones que no pasen por el tamiz se disgregaron en un mortero y tamizaron nuevamente. Los fragmentos orgánicos y grava que permanecieron en el tamiz fueron eliminados.
5. La muestra de fracción $> 2\text{mm}$ se homogenizó y almacenó en una bolsa de plástico hermético.

3.6.4.2. Determinación de agua y sólidos totales.

1. Se pesó en un recipiente con tapa hermética 20 g del suelo seco.
2. Se colocó en la estufa y secó destapado a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante por un

tiempo de 24 h.

3. Luego se retiró de la estufa, tapar y enfrió en desecador.
4. Se sacó del desecador y fue pesado inmediatamente con una exactitud de 0,01 g.
5. La fracción remanente correspondió al contenido de sólidos totales y la fracción evaporada, al contenido de agua.

$$\text{Agua del suelo seco a } 40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C} (\%) = \frac{g - h}{h - i} \times 100$$

donde:

g = masa en g del suelo seco a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (3.1.3) + recipiente
 h = masa en g del suelo seco a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ + recipiente

i = masa en g del recipiente

3.6.4.3. Análisis de pH.

1. Se colocó en un recipiente 20 g del sustrato.
2. Se le agregó 50 mL. de agua (relación suelo: agua 1:2.5 m/v) a una temperatura entre 20°C y 25°C .
3. Luego se agitó durante 5 min usando el agitador y se dejó reposar por al menos 2 horas
4. Se leyó el pH en el sobrenadante una vez estabilizada la lectura.

3.6.4.4. Conductividad eléctrica.

1. Se pesó 20 g del sustrato.
2. Se agregó 100 mL de agua destilada $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y tapó el frasco.
3. Se colocó el frasco en posición horizontal en el agitador durante 30 min. a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
4. Se filtró por papel filtro plegado y colectó lo filtrado.

3.6.4.1. Materia orgánica.

1. Se detectó la presencia de carbonatos agregando gotas de ácido clorhídrico (HCl) 0,05 M.
2. La aparición de burbujas indicó la presencia de carbonatos,
3. A) Si contiene carbonatos:
 1. Se colocó entre 10 -20 g de muestra seca $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y >2 mm. en un crisol pre-pesado.
 2. Se agregó ácido clorhídrico hasta que burbujee.
 3. Se secó en la estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 2 h.
 4. Se colocó en la mufla y se elevó lentamente la temperatura a 550°C durante 2 h y luego lentamente se disminuyó a menos de 200°C .
 5. Se secó y colocó en el desecador, luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.
 6. Finalmente se pesó y registró la masa con una exactitud de 0,001 g.
4. B) Si no contiene carbonatos:
 1. Se usó la muestra seca a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ después de la determinación del contenido de agua.
 2. Se colocó en la mufla y se elevó lentamente la temperatura a 550°C durante 2 h y luego lentamente se disminuyó a menos de 200°C .
 3. Se secó y colocó en el desecador, luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.
 4. Finalmente se pesó y registró la masa con una exactitud de 0,001 g.

5. Realización de cálculos:

A) Si contiene carbonatos

$$\text{Materia orgánica (\%)} = \frac{a - b}{a - c} \times 100 \times F_{h\text{suelo}}$$

donde:

a = masa en g. de suelo seco a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ + recipiente b = masa en g. del residuo de calcinación + recipiente c = masa en g. del recipiente

Fh suelo = Factor de corrección por humedad

Calcular el factor de corrección por humedad (Fh lodo) según:

$$Fh\ \text{suelo} = \frac{100 + \text{Agua}(\%)}{100}$$

Agua (%) = contenido de agua del suelo seco a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

B) Si no contiene carbonatos:

$$\text{Materia orgánica (\%)} = \frac{d - b}{d - c} \times 100$$

Donde:

b = masa, en g, del residuo de calcinación + recipiente c = masa, en g, del recipiente

d = masa, en g, de suelo seco a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ + recipiente

3.7. Análisis de datos

3.7.1. Comparaciones en las concentraciones de metales pesados

Las concentraciones de metales pesados en suelo fueron comparadas con los niveles máximos permitidos en el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelo 2017 para suelo agrícola, la cual es la normativa aplicada en Áreas Naturales Protegidas (MINAM_a, 2017).

Las concentraciones de metales pesados en el tallo de salicornia fueron comparadas con las concentraciones máximas permitidas para diversas especies vegetales establecidas entre las normativas consultadas. No se tomó en cuenta los niveles contenidos en chocolates dado que es un producto manufacturado (Codex Alimentarius, 2018; Ministerio de Industria Comercio y Turismo [MICT], 2017).

3.7.2. Índices de contaminación del suelo

Para la obtención de los índices de contaminación se trabajó con el promedio de las concentraciones de los metales pesados obtenidos en el estudio. A fin de obtener este promedio se optó por dar valores enteros a las concentraciones que se encontraban por debajo del límite de detección.

De acuerdo a lo establecido por Qingjie et al. (2008) se obtuvieron los siguientes índices de contaminación simples e integrados:

3.7.2.1. Factor de contaminación (C_f^i). Describe la contaminación de una sustancia tóxica presente en un lago o una subcuenca, sugerida por Håkanson (1980):

$$C_f^i = \frac{\bar{C}_{0-1}^i}{C_n^i}$$

Donde:

\bar{C}_{0-1}^i = contenido promedio de la sustancia “i” de al menos cinco sitios de muestreo.

C_n^i = es el nivel de referencia pre industrial de la sustancia.

Las siguientes terminologías son utilizadas para describir al factor de contaminación $C_f < 1$, bajo factor de contaminación; $1 \leq C_f < 3$, factor de contaminación moderado; $3 \leq C_f < 6$, factor de contaminación considerable; y $C_f \geq 6$, factor de contaminación alto (Qingjie, 2008).

Los valores de referencia pre industrial de metales pesados utilizados fueron

principalmente las concentraciones de metales pesados en sedimento cerca a la naciente del Rio Chillón y en el caso de los metales no referidos en este estudio, las concentraciones de metales pesados en lagos europeos y americanos (Håkanson, 1980; Chui et al., 2009; Qingjie et al., 2008).

3.7.2.2. Factor de riesgo ecológico (Eri). Expresa cuantitativamente el potencial riesgo ecológico de un contaminante, también sugerido por Håkanson (1980):

$$Er^i = Tr^i \cdot C_f^i$$

Donde:

Tr^i = factor de respuesta tóxica para una sustancia dada

C_f^i = factor de contaminación

Las siguientes terminologías son aplicadas para describir el factor de riesgo:

$Er^i < 40$, bajo riesgo ecológico potencial, $40 \leq Er^i < 80$, moderado riesgo ecológico potencial, $80 \leq Er^i < 160$, considerable riesgo ecológico potencial, $160 \leq Er^i < 320$, riesgo ecológico alto, $Er^i \geq 320$, riesgo ecológico potencial muy alto.

Los factores de respuesta tóxica para una sustancia dada (Tr^i) se obtuvieron de Håkanson (1980) y Qingjie et al. (2008).

3.7.2.3. Grado de contaminación (Cd). Fue originalmente definida como la suma de todos los factores de contaminación:

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i$$

Donde:

C^i = índice único de factor de contaminación

m = cantidad de especies de metales pesados

Las terminologías utilizadas para la descripción del grado de contaminación son: $C_d < m$, bajo grado de contaminación; $m \leq C_d < 2m$, moderado grado de contaminación, $2m \leq C_d < 4m$, grado de contaminación considerable; y $C_d > 4m$, muy alto grado de contaminación.

3.7.2.4. Índice de riesgo ecológico potencial (RI).

$$RI = \sum_{i=1}^m Er^i$$

Donde:

Er^i = Índice único de factor de riesgo ecológico

m = cantidad de especies de metales pesados

Las terminologías utilizadas para la descripción del índice de riesgo ecológico potencial son: $RI < 150$, bajo riesgo ecológico, $150 \leq RI < 300$, riesgo ecológico moderado; $300 \leq RI < 600$, riesgo ecológico considerable y $RI \geq 600$, riesgo ecológico muy alto cuando es utilizado por As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn.

3.7.2.5. Promedio de índice de contaminación (PI_{Avg}).

$$PI_{Avg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i$$

Donde:

P_i = Índice único de contaminación del metal pesado i

m = es la cantidad de especies de metales pesados

Un valor de $PI_{Avg} > 1.0$ indica baja calidad de suelo por la contaminación.

3.7.2.6. Nuevo Índice de Contaminación (PIN).

$$PIN = \sum_{i=1}^m W_i^2 P_i$$

Donde:

$$P_i = C_i / B_{1i}$$

C_i = Concentración del metal

B_{1i} = Concentración del contaminante i en Clase 1

m = es la cantidad de especies de metales pesados

W_i = Clase de metal pesado i

Los valores de PIN se encuentran en cinco escalas del 1 al 5, de acuerdo al rango de valores en que se clasifiquen. Clase 1 (Limpio): [0-7], Clase 2 (Trazas de contaminación): [7-95,1], Clase 3 (Ligeramente contaminado): [95,1-518,1], Clase 4 (Contaminado): [518,1-2548,6] y Clase 5 (Altamente contaminado): [2548,6- α] (Caeiro et al., 2005).

3.7.2.7. Índice de contaminación Nemerow ($PI_{Nemerow}$).

$$PI_{Nemerow} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i\right)^2 + P_{i \max}^2}{2}}$$

Donde:

$$P_i = C_i / S_i$$

P_i = Índice de contaminación del metal pesado i th

C_i = Es la concentración medida del metal pesado

S_i = El estándar requerido para el i th metal

PI_{max} = es el máximo valor del índice único de contaminación de todos los metales pesados

De acuerdo a Cheng *et al.* (2007) la clasificación de la calidad del suelo ha sido dividida en cinco grupos: $PI_{Nemerow} < 0.7$, dominio saludable; $0.7 \leq PI_{Nemerow} < 1$, dominio de precaución; $1 \leq PI_{Nemerow} < 2$, dominio ligeramente contaminado; $2.0 \leq PI_{Nemerow} < 3.0$, dominio contaminado moderadamente; y $PI_{Nemerow} > 3.0$, dominio contaminado seriamente.

3.7.2.8. Factor de Bioacumulación (FB). También conocido como factor de biocentración, este factor es calculado con los valores de los metales acumulados en el tejido de las especies vegetales con la concentración de metales en los tejidos de las raíces y de la parte aérea y la división entre el contenido de metales pesados del sedimento (Jara-Peña et al., 2017) En este caso se utilizó la concentración de MP en el tallo de *S. fruticosa* y su división con la concentración de MP del suelo aledaño.

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

Dónde:

FB = Factor de bioacumulación

C_{tallo} = Concentración de metales pesados en el tallo de la planta. C_{suelo} = Concentración de metales pesados en suelo.

El factor de bioacumulación indicó si la especie puede ser considerada como acumuladora, tolerante o exclusora de los elementos de interés. Las plantas con $FB > 1$ son considerados como acumuladoras o híper acumuladoras (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 (Jara-Peña et al., 2017).

3.7.3. *Procesamiento de datos*

Para la realización de análisis estadísticos no fueron considerados los metales pesados que no presentaban variaciones en sus concentraciones dado que no aportarían variabilidad a los análisis realizados. Además, para un mejor aprovechamiento de los datos en la obtención de los valores de bioacumulación y la realización de los análisis estadísticos se optó por transformar en valores enteros a las concentraciones de MP que se encontraban por debajo del rango de detección de los análisis realizados al suelo y a los tallos de *S. fruticosa*.

Se realizó la prueba de normalidad para ver si las muestras presentaban una distribución normal ($p > 0,05$). Posteriormente se procedió a realizar Dendrogramas de similaridad de euclídeana con Grupos Pareados (PGMA) a fin de observar el grado de relación entre los puntos muestreados de acuerdo al contenido de MP en suelo, MP en planta y bioacumulación de metales pesados.

Se realizó una Prueba de Correlación de Spearman entre los parámetros fisicoquímicos del suelo, la concentración de MP en suelo y planta, la bioacumulación de metales pesados y la zonificación a fin de determinar cuáles variables presentaban una correlación significativa entre sí ($r = \pm 0,07$), tomando en cuenta $p \leq 0,05$.

3.8. Consideraciones éticas

El diseño de la investigación se realizó en acorde a lo establecido por el Código de Ética para la investigación en la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV) (Universidad Nacional Federico Villarreal [UNFV]_a, 2018). Mediante la Resolución Administrativa N° 1429-2018-MINAGRI-SERFOR-ATFFS-LIMA, se obtuvo la autorización con fines de investigación científica de flora y/o fauna silvestre que otorga el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) (Ministerio de Agricultura, 2018). Dicha autorización contemplaba la colecta de ejemplares de *S. fruticosa* provenientes del ACR Humedales de

Ventanilla.

Durante la realización de análisis fisicoquímicos del suelo en el Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la UNFV se siguieron las normas establecidas por el Protocolo de Seguridad para Laboratorios y Talleres Ingenierías, Arquitectura y Ciencias Naturales (SSST-PS-02) respecto a la disposición de residuos generados, manejo de equipos, materiales, equipo de protección personal, entre otros (UNFV^b, 2018).

IV. RESULTADOS

4.1. Análisis fisicoquímicos del sustrato

4.1.1. Contenido de agua

Se encontró que el nivel más alto de contenido de agua lo presentó la zona de recuperación 1 (ZR1), mientras que el nivel más bajo lo presentó la zona turística 1 (ZT1) (Tabla 1).

4.1.2. pH

Se encontró que el nivel más alto lo presentó la zona de recuperación 3 (ZR3) con un valor de 8,46, mientras que el valor más bajo lo presentó la zona de recuperación 1 (ZR1) con un valor de 7,69 (Tabla 1).

4.1.3. Conductividad eléctrica

Se encontró que el nivel más alto lo presentó la zona de recuperación 3 (ZR3), mientras que el valor más bajo lo presentó la zona de recuperación 1 (ZR1) (Tabla 1).

4.1.4. Materia orgánica

Se encontró que el nivel más alto lo presentó la zona turística 3 (ZT3), mientras que el nivel más bajo lo presentó la zona silvestre 3 (ZS3) (Tabla 1).

Tabla 1

Valores de los parámetros fisicoquímicos realizados del suelo aledaño a *S. fruticosa*.

“subrayado” =valor mínimo, “negrita” =valor máximo.

	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (σ)	CONTENIDO DE AGUA (%)	MATERIA ORGÁNICA(%)
ZT1	7,91	7,61	<u>3,06</u>	4,34
ZT2	7,83	5,88	25,44	22,28
ZT3	7,82	3,45	25,26	47,64
ZR1	<u>7,69</u>	<u>2,60</u>	27,12	34,70
ZR2	7,78	2,52	21,92	29,92
ZR3	8,46	19,35	14,86	20,46
ZS1	7,85	5,38	24,34	31,69
ZS2	8,17	8,15	11,11	14,04
ZS3	8,04	2,69	3,43	<u>1,10</u>

4.2. Contenido de metales pesados del suelo superficial analizado

Se observó que la mayoría de los metales pesados analizados no excedieron los valores permisibles del Estándar de Calidad del Suelo (ECA Suelo) para suelo agrícola, la cual se aplica en caso de áreas naturales protegidas. Solamente en el caso del Pb en dos sectores (ZT1 y ZS1) muestreados resultaron mayores de $70 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ con $99,1$ y $120 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ correspondientemente, vale mencionar que en ZT3, ZR1 y ZS3 la concentración de plomo resultó menor a $0,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Tabla 2).

Tabla 2

Comparación de la concentración de metales pesados en suelo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) 2017. “negrita” =Aplicado en valores que exceden el ECA para suelos agrícolas del 2017

	ZT1	ZT2	ZT3	ZR1	ZR2	ZR3	ZS1	ZS2	ZS3	ECA SUELO (2017) ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
As	12,13	3,84	14,17	1,62	15,06	18,22	17,07	10,79	6,52	50
Sb	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	5,5	0,9	<0,6	-
Cd	0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	0,81	<0,17	<0,17	<0,17	1,4
Co	6,73	5,55	7,85	4,79	7,97	5,65	6,65	5,56	4,95	-
Cr	7,13	5,75	10,33	8,27	13,98	9,55	10,86	6,14	10,35	No especifica
Cu	24,08	16,76	16,53	8,74	40,75	53,42	318,0	15,17	12,92	-
St	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	-
Fe	13661	12291	21464	14918	25593	16885	21262	14890	21015	-
Mn	264,5	178,9	241,1	162,6	212,2	201,7	207,5	168,5	182,9	-
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	-
Pb	99,1	7,2	<0,3	<0,3	49,5	57,7	120,0	3,9	<0,3	70
Se	<1	<1	3	<1	2	<1	4	<1	<1	-
V	34,59	32,36	75,49	44,85	99,69	61,05	81,56	48,55	77,13	-
Zn	62,42	80,76	45,08	36,86	132,3	169,4	143,9	55,17	38,59	-

4.3. Contenido de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa*

Se encontró que los metales pesados halladas en el tallo de *S. fruticosa* perteneciente a ZT1 no excedieron las concentraciones establecidas en el Codex Alimentarius. En dicha zonificación el Cr excedió el valor máximo de la normativa establecida en Nueva Zelanda ($0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el Zn el valor máximo de la norma establecida en Sudáfrica ($5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Vale mencionar que la concentración de Pb en ZT1 y ZR1 resultó menor a $0,02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que en el resto de zonificaciones los metales pesados excedieron el mayor valor establecido en el Codex Alimentarius y el resto de normativas consultadas ($0,8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Tabla 3).

En ZT2 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para As y Pb, mientras el Cr, Cu, Pb y Zn del resto de normativas consultadas. En ZT3 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para Cd y Pb, mientras el Cr, Cu, Pb y Zn del resto de normativas consultadas. En ZR1 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para As. En ZR2 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius

para Pb, mientras el Sb, Cr, Cu, Pb y Zn del resto de normativas consultadas En ZR3 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para Pb, mientras el Cr, Pb y Zn del resto de normativas consultadas En ZS1 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para Pb, mientras el Cr, Cu, Pb, Se y Zn del resto de normativas consultadas. En ZS2 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para Cd y Pb, mientras el Cr, Cu, Pb y Zn del resto de normativas consultadas. Finalmente, en ZS3 se excedió el mayor valor establecido por el Codex Alimentarius para Pb, mientras el As, Cu, Pb y Zn del resto de normativas consultadas (Tabla 3).

Tabla 3

*Comparación de la concentración de metales pesados en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ del tallo de *S. fruticososa* con estándares de calidad. “negrita” = excede valor de Codex Alimentarius. “subrayado” = excede otros estándares. “negrita y subrayado” = excede todas las normativas consultadas.*

	ZT1	ZT2	ZT3	ZR1	ZR2	ZR3	ZS1	ZS2	ZS3	Codex Alimentarius	Otras estándares
As	<0,03	<u>1,571</u>	<0,03	<u>1,59</u>	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<u>0,17</u>	0,2-0,35	1
Sb	0,11	<0,02	0,85	<0,02	<u>2,75</u>	1,38	<0,02	<0,02	<0,02	-	2
Cd	0,23	0,16	0,59	0,13	0,35	0,39	0,34	0,55	0,39	0,05-0,4	1
Co	0,59	0,35	1,32	0,50	1,27	0,26	0,95	0,33	0,94	-	-
Cr	<u>1,01</u>	<u>0,47</u>	<u>0,53</u>	<u>0,27</u>	<u>0,56</u>	<u>0,24</u>	<u>0,49</u>	<u>0,51</u>	0,10	-	0,1
Cu	6,32	<u>11,91</u>	<u>16,19</u>	5,83	<u>13,77</u>	9,48	<u>21,10</u>	<u>12,74</u>	<u>12,26</u>	NE	30
St	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	<1,4	NE	250
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	0,4
Ni	<0,02	<0,02	1,40	0,15	<0,02	0,07	0,49	<0,02	0,67	-	5
Pb	<0,02	<u>1,07</u>	<u>8,22</u>	<0,02	<u>2,98</u>	<u>4,31</u>	<u>4,73</u>	<u>7,43</u>	<u>3,72</u>	0,05-0,4	0,8
Se	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,09	<0,04	<u>0,59</u>	<0,04	<0,04	-	0,3
V	0,549	0,71	1,715	0,326	0,959	0,451	<u>1,831</u>	1,024	1,262	-	-
Zn	<u>22,75</u>	<u>61,10</u>	<u>76,82</u>	<u>20,93</u>	<u>42,36</u>	<u>41,91</u>	<u>47,29</u>	<u>40,34</u>	<u>31,54</u>	-	5

4.4. Índices de contaminación del suelo

Respecto a los índices de contaminación simples: todos los metales analizados presentan bajo factor de contaminación (C^i) y riesgo ecológico potencial (Er^i). En cuanto a los índices de contaminación integrados: el humedal presenta bajo grado de contaminación (C_d), riesgo ecológico (RI), no presenta baja calidad del suelo por la contaminación (PI_{Avg}), trazas de contaminación (PIN) y un dominio saludable de acuerdo al Índice de Contaminación Nemerow ($PI_{Nemerow}$) (Tabla 4).

Tabla 4

Índices de contaminación del suelo del ACR Humedales de Ventanilla. ACR-HV (\bar{x})= Promedio de la concentración de metales pesados del ACR Humedales de Ventanilla ($mg \square kg^{-1}$), Clase= Clasificación de acuerdo a la concentración de cada metal pesado ($mg \square kg^{-1}$), Estándar= Concentraciones permisibles de los metales pesados de acuerdo a las normativas

	Valores	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Factor de Respuesta tóxica		10	30		2	5		40			5	1
Referencia Preindustrial	Lagos europeos y americanos Rio Chillón	15	1		90	50		0,25			70	175
ACR HV (\bar{x})		11,05	0,24	6,19	9,15	56,26	17998	0,030	202,210	3,230	37,590	84,940
Clase		1	1		1	2		1			1	1
Estándar		50	1,4		400	40	37000	6,60	800	80	70	50
C_f^i		0,737	0,240	0,529	0,102	4,328	0,692	0,120	0,245		0,895	0,976
Er^i		7,367	7,200		0,203	21,638		4,800			4,475	0,976
C_d	8,172											
RI	46,660											
PI_{Avg}	0,817											
PIN	8,5139											
$PI_{Nemerow}$	1,240											

consultadas.

4.5. Bioacumulación de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa*

Se halló que *S. fruticosa* se comporta como acumulador de Fe en todas las muestras.

Sin embargo, esta planta presenta diversos comportamientos de absorción para el resto de

metales pesados analizados (Tabla 5).

Tabla 5

Clasificación de los valores de bioacumulación del tallo de S. fruticosa. E=Exclusora, T=Tolerante, A=Acumuladora.

	ZT1	ZT2	ZT3	ZR1	ZR2	ZR3	ZS1	ZS2	ZS3
As	0,00 ^E	0,41 ^T	0,00 ^E	0,98 ^T	0,00 ^E	0,00 ^E	0,00 ^E	0,00 ^E	0,03 ^E
Sb	0,18 ^T	0,04 ^E	1,42 ^A	0,04 ^E	4,59 ^A	2,30 ^A	0,00 ^E	0,02 ^E	0,04 ^E
Cd	1,35 ^A	0,96 ^T	3,44 ^A	0,74 ^T	2,08 ^A	0,48 ^T	1,99 ^A	3,24 ^A	2,29 ^A
Co	0,09 ^E	0,06 ^E	0,17 ^T	0,11 ^T	0,16 ^T	0,05 ^E	0,14 ^T	0,06 ^E	0,19 ^T
Cr	0,14 ^T	0,08 ^E	0,05 ^E	0,03 ^E	0,04 ^E	0,03 ^E	0,05 ^E	0,08 ^E	0,01 ^E
Cu	0,26 ^T	0,71 ^T	0,98 ^T	0,67 ^T	0,34 ^T	0,18 ^T	0,07 ^E	0,84 ^T	0,95 ^T
Fe	0,00 ^E	0,01 ^E	0,01 ^E	0,00 ^E	0,01 ^E	0,00 ^E	0,01 ^E	0,01 ^E	0,00 ^E
Mn	0,05 ^E	0,07 ^E	0,08 ^E	0,07 ^E	0,11 ^T	0,09 ^E	0,06 ^E	0,09 ^E	0,12 ^T
Hg	0,07 ^E	0,07 ^E	1,15 ^T	0,07 ^E	0,07 ^E	0,07 ^E	0,91 ^T	0,07 ^E	0,98 ^T
Ni	0,00 ^E	0,00 ^E	0,64 ^T	0,07 ^E	0,00 ^E	0,01 ^E	0,20 ^T	0,00 ^E	0,27 ^T
Pb	0,00 ^E	0,15 ^T	27,40 ^A	0,07 ^E	0,06 ^E	0,07 ^E	0,04 ^E	1,91 ^A	12,40 ^A
Se	0,04 ^E	0,04 ^E	0,01 ^E	0,04 ^E	0,05 ^E	0,04 ^E	0,15 ^T	0,04 ^E	0,04 ^E
V	0,02 ^E	0,02 ^E	0,02 ^E	0,01 ^E	0,01 ^E	0,01 ^E	22,45 ^A	21,09 ^A	16,36 ^A
Zn	0,36 ^T	0,76 ^T	1,70 ^A	0,57 ^T	0,32 ^T	0,25 ^T	0,33 ^T	0,73 ^T	0,82 ^T

4.6. Análisis estadísticos

4.6.1. Análisis relacionados al contenido de metales pesados en el suelo

4.6.1.1. Prueba de normalidad para los parámetros fisicoquímicos del suelo. Se realizó el test de normalidad de los 4 factores evaluados (pH, conductividad, contenido de agua y materia orgánica) para las zonas muestreadas. Se halló que la conductividad eléctrica no presentaba una distribución normal dado que el valor p resultó menor a 0,05 (Tabla 6).

Tabla 6

Prueba de normalidad para los parámetros fisicoquímicos analizados del suelo.

	pH	Conductividad eléctrica (σ)	Contenido de agua (%)	Materia orgánica(%)
Shapiro-Wilk W	0,87	0,74	0,85	0,97
p(normal)	0,13	0,00	0,07	0,92

4.6.1.2. Prueba de normalidad para los metales pesados del suelo. Se encontró que el As, Co, Cr, Fe, Mn, Ni y Zn presentaron una distribución normal. En cambio, el Sb, Cd, Cu, Pb y Se no presentaron una distribución normal (Tabla 7).

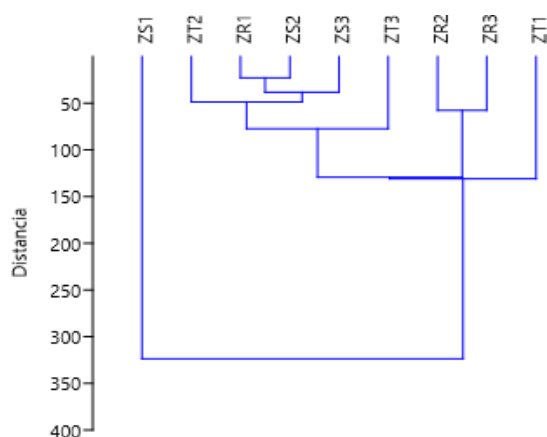
Tabla 7. *Prueba de normalidad para los metales pesados presentes en el suelo. “negrita” =valores sin distribución normal.*

	As	Sb	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Se	V	Zn
Shapiro-Wilk W	0,94	0,42	0,39	0,90	0,95	0,51	0,92	0,94	0,84	0,81	0,68	0,94	0,86
p(normal)	0,54	0,00	0,00	0,25	0,69	0,00	0,42	0,53	0,06	0,02	0,00	0,62	0,09

4.6.1.3. Relación entre las zonificaciones por la concentración de metales pesados del suelo. No se encontró que la zonificación resultara determinante en el agrupamiento de las concentraciones de metales pesados en el suelo (Figura 3).

Figura 3

Dendrograma de similaridad de euclídeana con grupos pareados (PGMA) para MP del suelo proveniente del ACR Humedales de Ventanilla.



4.6.2. Análisis relacionados al contenido de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa*

4.6.2.1. Prueba de normalidad para los metales pesados presentes en el tallo de *S. fruticosa*. Se encontró que el Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn presentaron una distribución normal. En cambio, As, Sb, Fe, Hg, Ni y Se no presentaron una distribución normal (Tabla 8).

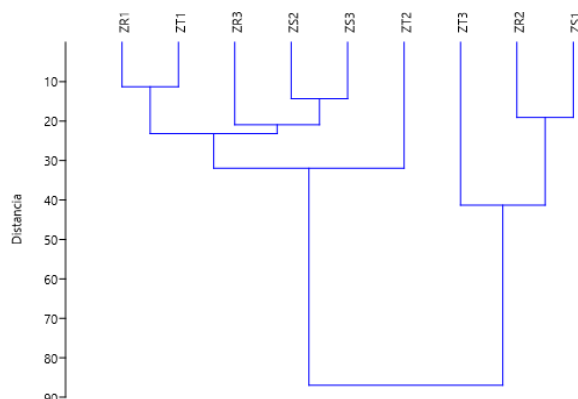
Tabla 8. Test de normalidad para los metales pesados presentes en el tallo de *S. fruticosa*. “negrita”=Valores sin distribución normal.

	As	Sb	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Shapiro-Wilk W	0,57	0,68	0,94	0,89	0,91	0,95	0,80	0,85	0,66	0,72	0,93	0,44	0,94
p(normal)	0,00	0,00	0,60	0,22	0,28	0,73	0,02	0,07	0,00	0,00	0,48	0,00	0,55

4.6.2.2. Relación entre las zonificaciones por las concentraciones de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa*. No se encontró que la zonificación resultara determinante en el agrupamiento de las concentraciones de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa* (Figura 4).

Figura 4

*Dendrograma de similitud de euclídeana con grupos pareados (PGMA) para los metales pesados del tallo de *S. fruticosa*.*



4.6.3. Análisis relacionados a los factores de bioacumulación de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa*

4.6.3.1. Prueba de normalidad para los metales pesados presentes en el tallo de *S. fruticosa*. Se encontró que los factores de bioacumulación de As, Sb, Hg, Ni, Pb, Se, V y Zn presentan una distribución normal, mientras que los factores de bioacumulación del Cd, Co, Cr, Fe y Mn no presentan una distribución normal (Tabla 9).

Tabla 9

*Test de normalidad para los factores de bioacumulación del tallo de *S. fruticosa*.*

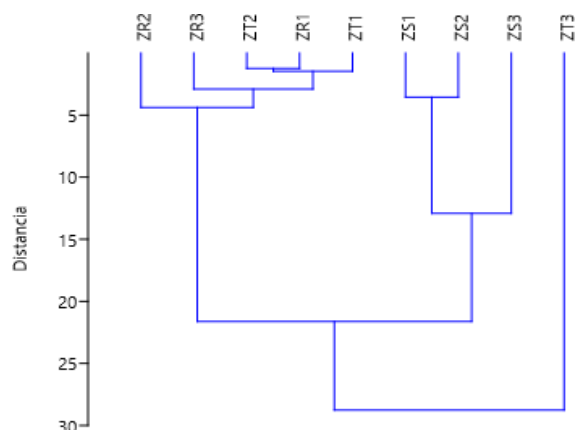
BIO=Bioacumulación, “negrita” =Valores sin distribución normal.

	BIO-As	BIO-Sb	BIO-Cd	BIO-Co	BIO-Cr	BIO-Cu	BIO-Fe	BIO-Hg	BIO-Mn	BIO-Ni	BIO-Pb	BIO-Se	BIO-V	BIO-Zn
Shapiro-Wilk W	0.56	0.69	0.94	0.92	0.90	0.91	0.95	0.66	0.98	0.70	0.59	0.57	0.66	0.80
p(normal)	0.00	0.00	0.56	0.40	0.25	0.31	0.66	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02

4.6.3.2. Relación entre las zonificaciones por los valores de bioacumulación del tallo de *S. fruticosa*. No se halló relación entre las zonificaciones y la bioacumulación de metales pesados en estas zonas (Figura 5).

Figura 5

*Dendrograma de similitud de euclídeana con grupos pareados (PGMA) para los factores de bioacumulación del tallo de *S. fruticosa*.*



4.6.4. Interacción entre los parámetros fisicoquímicos y metales del suelo, la bioacumulación de metales pesados y la zonificación.

4.6.4.1. Zonificación. Ninguna de las zonas estudiadas presentó correlación significativa ($p < 0,05$) con los otros elementos analizados.

4.6.4.2. Parámetros fisicoquímicos del suelo. El pH del suelo presenta una correlación positiva con la conductividad eléctrica del suelo ($r=0,8$, $p=0,01$) y una correlación negativa con el contenido de agua ($r=-0,72$, $p=0,03$) y la materia orgánica ($r=-0,73$, $p=0,03$) del suelo. Adicionalmente, entre el contenido de agua y la materia orgánica existe una correlación positiva ($r=0,85$, $p=0,01$).

La conductividad eléctrica presentó una correlación negativa con la concentración en la planta de Co ($r=-0,7$, $p=0,043$) y su factor de bioacumulación ($r=-0,8$, $p=0,01$). La materia orgánica presenta una correlación positiva con el factor de bioacumulación de Fe ($r=0,7$, $p=0,04$).

4.6.4.2. Arsénico (As). La concentración de As en el suelo presenta una correlación positiva con la concentración en suelo de Co ($r=0,71$, $p=0,03$), Cu ($r=0,85$, $p=0,01$), Zn ($r=0,78$, $p=0,01$). Sin embargo, la concentración de As en el suelo se correlaciona negativamente con su concentración en la planta ($r=-0,84$, $p=0,02$) y su factor de bioacumulación ($r=-0,95$, $p=0,00$).

La concentración de As en la planta se correlaciona negativamente con la concentración en el suelo de Co ($r=-0,82$, $p=0,03$), en cambio, se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,88$, $p=0,01$).

Su factor de bioacumulación se correlaciona negativamente con la concentración en suelo de Cu ($r=-0,81$, $p=0,01$), Zn ($r=-0,75$, $p=0,03$).

4.6.4.3. Antimonio (Sb). La concentración de Sb en la planta se correlaciona

positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,92$, $p=0,00$) y la concentración en suelo de Co ($r=0,77$, $p=0,03$).

4.6.4.4. Cadmio (Cd). La concentración de Cd en la planta se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Mn ($r=0,7$, $p=0,04$), Pb ($r=0,85$, $p=0,01$), además se correlaciona positivamente su factor de bioacumulación ($r=0,75$, $p=0,03$).

4.6.4.5. Cobalto (Co). La concentración de Co en el suelo presenta una correlación positiva con la concentración en suelo de As ($r=0,71$, $p=0,03$), Mn ($r=0,87$, $p=0,00$). Además, presenta una correlación positiva con la concentración en la planta de Sb ($r=0,77$, $p=0,03$), Cr ($r=0,78$, $p=0,01$) y una correlación negativa con la concentración en la planta de As ($r=-0,82$, $p=0,03$),

La concentración en la planta de Co se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,88$, $p=0$). Además, se correlaciona negativamente con la conductividad eléctrica del suelo ($r=-0,7$, $p=0,04$) y se correlaciona positivamente con la concentración en suelo de Cr ($r=0,7$, $p=0,04$), Fe ($r=0,73$, $p=0,03$), Se ($r=0,78$, $p=0,04$) y con la concentración en la planta de Fe ($r=0,83$, $p=0,01$).

Su factor de bioacumulación se correlaciona negativamente con la conductividad eléctrica del suelo ($r=-0,8$, $p=0,01$), la concentración en la planta de Fe ($r=0,75$, $p=0,02$) y Hg ($r=0,75$, $p=0,04$) y con el factor de bioacumulación de Hg ($r=0,75$, $p=0,04$).

4.6.4.6. Cromo (Cr). La concentración de Cr en suelo presenta una correlación positiva con la concentración en suelo de Fe ($r=0,93$, $p=0$), V ($r=0,95$, $p=0$), también con la concentración en la planta de Co ($r=0,7$, $p=0,04$).

La concentración en la planta de Cr se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,75$, $p=0,03$), con la concentración en el suelo de Co ($r=0,78$, $p=0,01$).

4.6.4.7. Cobre (Cu). La concentración de Cu en suelo presenta una correlación negativa

con su factor de bioacumulación ($r=-0,77$, $p=0,02$), también presenta una correlación positiva con la concentración en suelo de As ($r=0,85$, $p=0,01$), Pb ($r=0,9$, $p=0,00$) y Zn ($r=0,95$, $p=0,00$). En cambio, la concentración en el suelo de Cu se correlaciona negativamente con el factor de bioacumulación de As ($r=-0,81$, $p=0,01$).

La concentración de Cu en la planta se correlaciona positivamente con la concentración en el suelo de Se ($r=0,84$, $p=0,02$) y V ($r=0,71$, $p=0,03$). Así mismo, se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Fe ($r=0,88$, $p=0,00$), Pb ($r=0,76$, $p=0,02$), V ($r=0,92$, $p=0,00$) y Zn ($r=0,72$, $p=0,03$), con el factor de bioacumulación de Cd ($r=0,7$, $p=0,04$), Fe ($r=0,7$, $p=0,04$) y V ($r=0,72$, $p=0,03$).

Su bioacumulación se correlaciona negativamente con la concentración en suelo de Pb ($r=-0,88$, $p=0$) y positivamente con el factor de bioacumulación del Pb ($r=0,87$, $p=0$) y Zn ($r=0,9$, $p=0,03$).

4.6.4.8. Hierro (Fe). La concentración de Fe en suelo presenta una correlación positiva con su concentración en la planta ($r=0,72$, $p=0,03$), la concentración en suelo de Cr ($r=0,93$, $p=0$), Se ($r=0,77$, $p=0,04$), V ($r=0,93$, $p=0,00$), también con la concentración en la planta de Co ($r=0,73$, $p=0,03$).

La concentración en la planta de Fe se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,74$, $p=0,03$), con la concentración en suelo de Se ($r=0,83$, $p=0,03$) y la concentración en la planta de Co ($r=0,83$, $p=0,01$), Cu ($r=0,89$, $p=0,00$), V ($r=0,86$, $p=0,00$), con el factor de bioacumulación de Cd ($r=0,78$, $p=0,02$), Co ($r=0,75$, $p=0,02$)

Su bioacumulación se correlaciona positivamente con la materia orgánica del suelo ($r=0,7$, $p=0,04$), con la concentración en suelo de Se ($r=0,75$, $p=0,04$), con la concentración en la planta de Cu ($r=0,7$, $p=0,04$), Fe ($r=0,74$, $p=0,03$) y Zn ($r=0,75$, $p=0,03$).

4.6.4.9. Manganeso (Mn). La concentración en suelo de Mn presenta correlación

positiva con la concentración en suelo de Co ($r=0,87$, $p=0,00$).

La concentración de Mn en la planta se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,78$, $p=0,01$) y con la concentración en la planta de Cd ($r=0,7$, $p=0,04$).

4.6.4.10. Mercurio (Hg). La concentración de Hg en la planta se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=1$, $p=0,01$), con la concentración en la planta de Ni ($r=0,88$, $p=0,01$) y V ($r=0,78$, $p=0,04$) y con el factor de bioacumulación de Co ($r=0,75$, $p=0,04$).

Su factor de bioacumulación se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Ni ($r=0,88$, $p=0,01$), V ($r=0,78$, $p=0,04$) y el factor de bioacumulación de Co ($r=0,75$, $p=0,04$).

4.6.4.11. Níquel(Ni). La concentración de Ni en el suelo se correlaciona negativamente con su concentración en la planta ($r=-0,71$, $p=0,04$) y con su factor de bioacumulación ($r=-0,76$, $p=0,02$).

La concentración de Ni en la planta se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación ($r=0,96$, $p=0$), la concentración en la planta de Hg ($r=0,88$, $p=0,01$) y el factor de bioacumulación de Hg ($r=0,88$, $p=0,01$).

El factor de bioacumulación de Ni se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Hg ($r=0,85$, $p=0,02$) y con el factor de bioacumulación de Hg ($r=0,85$, $p=0,02$).

4.6.4.12. Plomo(Pb). La concentración de Pb en suelo presenta una correlación negativa con su factor de bioacumulación ($r=-0,78$, $p=0,02$), una correlación positiva con la concentración en suelo de Cu ($r=0,9$, $p=0,00$) y Zn ($r=0,85$, $p=0,01$) y una correlación negativa con el factor de bioacumulación de Cu ($r=-0,88$, $p=0,00$) y Zn ($r=-0,75$, $p=0,03$).

La concentración de Pb en la planta se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Cd ($r=0,85$, $p=0,01$), Cu ($r=0,76$, $p=0,02$) y V ($r=0,72$, $p=0,03$).

Su factor de bioacumulación se correlaciona positivamente con la bioacumulación de Cu ($r=0,87$, $p=0$) y Zn ($r=0,75$, $p=0,03$).

4.6.4.12. Selenio (Se). La concentración en suelo de Se presenta una correlación positiva con la concentración en suelo de Fe ($r=0,77$, $p=0,04$), con la concentración en la planta de Co ($r=0,73$, $p=0,04$), Cu ($r=0,84$, $p=0,02$), Fe ($r=0,83$, $p=0,03$) y el factor de bioacumulación de Fe ($r=0,75$, $p=0,04$).

4.6.4.13. Vanadio (V). La concentración en suelo de V se correlaciona significativamente con la concentración en suelo de Cr ($r=0,95$, $p=0,00$), Fe ($r=0,93$, $p=0,00$) y la concentración en la planta de Cu ($r=0,71$, $p=0,03$).

La concentración de V en la planta se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Cu ($r=0,92$, $p=0,00$), Fe ($r=0,86$, $p=0,00$), Hg ($r=0,78$, $p=0,04$), Pb ($r=0,72$, $p=0,03$), con el factor de bioacumulación de Cd ($r=0,78$, $p=0,01$), Hg ($r=0,78$, $p=0,04$).

Adicionalmente, su bioacumulación se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Cu ($r=0,72$, $p=0,03$).

4.6.4.14. Zinc(Zn). La concentración de Zn en suelo presenta una correlación negativa con su factor de bioacumulación ($r=-0,73$, $p=0,03$), una correlación positiva con la concentración en suelo de As ($r=0,78$, $p=0,01$), Cu ($r=0,95$, $p=0,00$), Pb ($r=0,85$, $p=0,01$). En cambio, la concentración en el suelo de Zn se correlaciona negativamente con el factor de bioacumulación de As ($r=-0,75$, $p=0,03$).

La concentración de Zn en la planta se correlaciona positivamente con la concentración en la planta de Cu ($r=0,72$, $p=0,03$) y con el factor de bioacumulación de Fe ($r=0,75$, $p=0,03$).

El factor de bioacumulación de Zn se correlaciona negativamente con la concentración en suelo de Pb ($r=-0,75$, $p=0,03$), se correlaciona positivamente con el factor de bioacumulación de Cu ($r=0,9$, $p=0,00$) y Pb ($r=0,75$, $p=0,03$).

V. Discusión de resultados

5.1. Fuentes de contaminación de metales pesados en el suelo del ACR Humedales de Ventanilla

Debido que la zonificación no presentó una correlación significativa con ninguno de las variables evaluadas, se estima que las actividades realizadas en las zonas estudiadas no determinan la concentración de metales pesados en el suelo. Una fuente de ingreso de metales pesados al ACR Humedales de Ventanilla la constituye el Rio Chillón, su principal afluente, con concentraciones de 0,013, 0,15, 0,0792 y 0,053 mg/l para Cd, Cu, Pb y Zn; respectivamente (GRC, 2011). Donde el Pb excede los niveles establecidos en la Categoría 3 del ECA para agua 2017 (0,05 mg/L). Además, el monitoreo de las fuentes de contaminación en ecosistemas acuáticos resulta en un paso crucial para reducir los impactos ambientales de los contaminantes (Esmaeilzadeh et al., 2017).

Hou et al. (2014) mencionan que la deposición atmosférica es la principal fuente de introducción de metales al suelo cuando se consideran a gran escala regional, donde los fertilizantes inorgánicos y los lodos provenientes de aguas residuales han sido responsables de un pequeño incremento de metales en suelos. Además, la actividad industrial y el tráfico automotor cumplen un rol importante en la formación de partículas y en consecuencia la concentración de partículas en áreas urbanas es alta comparada con áreas no urbanas, asimismo los metales pesados tienden depositarse en áreas alejadas a su fuente de origen (Machado et al., 2008). En especial el transporte automovilístico, causa una contaminación seria de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, etc.) (Su *et al.*, 2014). Cabe mencionar que, salvo el Hg, los metales pesados básicamente entran a la atmosfera en forma de aerosol (Su et al., 2014).

En la Región Callao la concentración de material particulado inhalable (PM10) en la atmósfera presenta una media de 34,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 2,35% del suelo se encuentra contaminado

con Pb (GRC, 2011). A su vez, en un estudio realizado en el estado Zulia de Venezuela, caracterizado por la gran carga vehicular que presenta, se analizó la concentración de PM10 obteniendo en la dispersión una media de $46,87 \pm 18,67$ ug/m³ con concentraciones medias en dispersión de $0,03 \pm 0,01$, $0,05 \pm 0,01$, $0,66 \pm 0,22$ y $0,04 \pm 0,01$ ug/m³ para Cr, Ni, Pb y Zn; respectivamente (Machado et al., 2008). Tomando en cuenta la información recopilada y que el ACR Humedales de Ventanilla se encuentra a 2 km tanto de la Zona Industrial de Ventanilla como de la Refinería La Pampilla, el aire puede constituir una importante fuente continua de ingreso de metales pesados al suelo y además se explicaría la baja concentración de Hg en suelo y agua también (Fajardo et al., 2017).

5.2. Nivel de contaminación del suelo del ACR Humedales de Ventanilla

De acuerdo a Puga et al. (2006) los metales tienden a acumularse en la superficie del suelo. Además, según los índices de contaminación evaluados (C^i , Er^i , C_d , RI , PI_{Avg} , PIN y $PI_{Nemerow}$), se establece que el suelo del ACR Humedales de Ventanilla presenta baja contaminación por metales pesados. Razón por la cual, el perfil de contaminación del suelo superficial realizado constituye una importante línea de referencia de límite máximo de contaminación de los metales pesados presentes en el suelo total.

Además, las concentraciones de metales pesados en los valores de referencia pre industrial en lagos europeos y americanos establecidos por Håkanson (1980), son mayores que las concentraciones de metales pesados en sedimento del Rio Chillón utilizados (Chui et al., 2009; Qingjie et al., 2008). Se estima que los coeficientes de contaminación de los metales pesados no reportados en el Rio Chillón del presente estudio resultarían menores que los obtenidos si se contara con información de ellos en el sedimento de ese río.

A pesar que en el suelo del ACR Humedales de Ventanilla solamente el Pb excede la concentración establecida por el ECA para suelos agrícolas, las concentraciones máximas

establecidas para vegetales por el Codex Alimentarius es excedida en dos puntos de muestro por parte del As y Cd, y en siete puntos por el Pb (MINAM_b, 2017; Codex Alimentarius, 2018). En el presente estudio se encontró que la bioacumulación de estos metales eran afectados por la concentración en suelo de los mismos y principalmente de Cu, entre otros metales pesados. Razón por la cual, la presencia de varios metales pesados en un área no solo resulta importante por la magnificación de la contaminación (Su et al., 2014) sino también por su relación en la bioacumulación de otros metales pesados por la planta (Peralta- Videa et al., 2009).

5.3. Parámetros fisicoquímicos del suelo del ACR Humedales de Ventanilla

El alto valor de la conductividad eléctrica en ZR3 (19,35) se debería a que el suelo aledaño de la salicornia era de poco grosor (<5 cm), este se encontraba constituido en gran parte por una fina capa superficial de sal producto de la compactación de las capas inferiores. Dado que los suelos arenosos presentan una alta densidad (1,2 a 1,8 g/cm³) que puede verse aumentada por el tráfico frecuente o pesado (FAO, 2000) y que el punto de muestreo se encontraba ubicado al interior de los restos del AAHH Proceres, caracterizado por la presencia de desmontes, relleno y restos de viviendas de concreto, estas estructuras habrían favorecido la compactación del suelo.

Los mayores valores de materia orgánica del suelo se encontraron en ZR1 (34,7%) y ZT3 (47,64%). A pesar que la salicornia extraída de ZR1 provenía de una vegetación salicornial mixta caracterizada por un continuo pastoreo y residuos de excretas en sus alrededores y que la muestra de salicornia de ZT3 se encontraba en una comunidad vegetal salicornial sin tránsito en las cercanías. Esta relación se explica debido a que el exceso de pastoreo reduce la entrada de carbono al suelo (Docampo, 2012). Así mismo, se hallaron porcentajes muy bajos de materia orgánica en suelo en ZT1 y ZS3 (4,34 y 1,4; respectivamente), además en ambos casos también se registraron los porcentajes mínimos de contenido de agua (3,06 y 3,43; respectivamente). Vale acotar que el porcentaje de materia orgánica presenta una fuerte correlación con el

contenido de agua del suelo del humedal. Esta relación se explica debido a que la materia orgánica del suelo (SOM) cumple funciones como la retención de agua y el drenaje, el control de la erosión, remediación de la contaminación, etc (FAO, 2000).

En el presente estudio se encontró que los parámetros fisicoquímicos se encuentran bastante correlacionados, siendo el pH el único factor que se correlaciona fuertemente con el resto de parámetros fisicoquímicos. Además, el pH del suelo es el principal factor que condiciona los procesos de absorción en el suelo y la actividad de los metales (Cárdenas, 2012) y la materia orgánica puede también jugar un rol importante mediante reacciones de quelación que incrementan la solubilidad de los metales pesados, de esa manera controlando su biodisponibilidad (Geng et al., 2019) y que puede ser la principal fuente de capacidad de intercambio catiónico en las capas superficiales del suelo (Cárdenas, 2012), además resulta importante mencionar que la habilidad del suelo para contener metales pesados aumenta con su capacidad de intercambio catiónico (CEC) (Li et al., 2019).

Así mismo, acondicionadores orgánicos tales como abono, compost, o biochar ayudan a decrecer la biodisponibilidad de metales y resultan una forma común y útil de mejorar la calidad de los suelos (Tang et al., 2019). Sin embargo, solamente la conductividad eléctrica y la materia orgánica se correlacionan fuertemente con el factor de bioacumulación de dos metales pesados (Co y Fe; respectivamente). La baja relación presente entre el pH del suelo y la bioacumulación de los metales pesados por *S. fruticosa* puede deberse a su baja variabilidad en el estudio. Resulta importante adherir que, si bien los parámetros fisicoquímicos pueden controlar los niveles disponibles de metales pesados en el suelo, distintos mecanismos fisiológicos a nivel de especie pueden resultar más determinantes para su acumulación (Domínguez et al., 2008; Rossini-Oliva et al., 2019).

5.4. Variación en la concentración de metales pesados del ACR Humedales de Ventanilla

Las concentraciones de metales pesados en el suelo (As, Cd, Hg y Pb) en la mayoría de los casos resultaron mayores que las concentraciones de metales pesados en los cuerpos de agua del ACR Humedales de Ventanilla en la misma estación del año (Fajardo et al., 2017). Las condiciones inundadas influyen positivamente en la formación de placas de Fe sobre la superficie de las raíces en la rizósfera y el grado de bioacumulación de metales pesados por las plantas de humedales (Yang et al., 2017), estas placas de Fe tienden a absorber la mayor parte de la materia orgánica del suelo (SOM) en los humedales y gracias a ello, el suelo rizosférico puede contener mayores niveles de Mn, Fe y otros metales (Wen et al., 2018). Así también, cuando se incrementa el oxígeno disuelto en la columna de agua se puede incrementar el potencial redox (Eh), bajo estas condiciones los sulfuros son oxidados y se disuelven termodinámicamente las uniones inestables sulfuros-metales pesados, esto genera que se incremente la movilidad de estos elementos.

Vale recalcar que las muestras de suelo y plantas provinieron de zonas accesibles, donde las plantas crecen en lugares no inundados. Razón por la cual, la concentración de metales pesados en el tallo de *S. fruticosa* resultaría diferente en estaciones del año donde se incrementa el nivel del agua.

Entre los seis metales pesados que presentan mayores concentraciones en el suelo del ACR Humedales de Ventanilla encontramos Fe, Mn, Zn, V, Cu y Pb (Ver Figura 6); mientras que en la planta los metales que presentan grandes concentraciones son Zn, Fe, Mn, Cu, Pb y Cr. Vale recalcar que Zn, Fe, Mn, Cu, Cr, Co y Se son considerados elementos esenciales para las plantas y en cambio As, Cd, Hg, Pb son considerados no esenciales (Bonanno et al., 2017). Estas concentraciones demuestran que los metales esenciales se suelen encontrar en altas concentraciones en el suelo y la planta presenta cierta predilección por su absorción.

Además, en el estudio se halló que las concentraciones en suelo de As, Cu, Ni, Pb y Zn se correlacionan negativamente con sus factores de bioacumulación. Estas correlaciones indican que en la mayoría de los casos la absorción de metales pesados se vería más afectada por los factores que limitan la absorción de estos metales y las interrelaciones entre los diversos elementos en el suelo que la concentración misma del metal pesado en el suelo (Domínguez et al., 2008; Rossini-Oliva et al., 2019; Peralta-Videa et al., 2009; Yang et al., 2017).

También se ha reportado que Cr (VI) reduce la captación de elementos esenciales como Fe y Mn. Si bien en el estudio, la concentración de Cr en suelo se correlaciona positivamente con la concentración de Fe en suelo, la concentración de Cr en suelo no mostró una fuerte correlación con el factor de bioacumulación de estos elementos. Así mismo, el Cr (III) es el estado más estable de oxidación y el más común (Peralta-Videa et al., 2009). Tomando en cuenta la información antes propuesta, se sugiere que el Cr del suelo se encuentra en otra conformación.

Así mismo, se encontró altos valores de desviación estándar en Fe, Cu, Mn, Pb, V y Zn del suelo (<10) (Tabla 10). Sin embargo, en las concentraciones en la planta encontramos al Fe y Zn (Tabla 11), mientras que solo presenta altos valores en la bioacumulación de V (Tabla 12). La alta variabilidad de la concentración de Fe y Zn en el tallo de *S. fruticosa* respondería a la alta variabilidad de sus concentraciones en el suelo. Se estima que la alta desviación estándar en el factor de bioacumulación del V responde en parte a los mecanismos que presenta la planta de absorción del V en su interior.

Además, una planta es capaz de presentar diversos grados de acumulación de metales pesados dependiendo del ecosistema en el que se encuentre (Bonanno *et al.*, 2018; Bavandpour, 2018). En el presente estudio se encontró que los ejemplares de *S. fruticosa* en el ACR Humedales de Ventanilla son capaces de representar una gran diversidad en el grado de bioacumulación para un solo metal en los puntos muestreados, incluso se llega a comportar

como exclusora, tolerante y acumuladora en el caso de Sb y Pb, como exclusora y acumuladora en V, como tolerante y acumuladora para Cd y Zn y además, solamente expresa un comportamiento de acumulación en el caso del Fe, el de exclusora (Figura 7). Estos comportamientos de acumulación resultan importantes en la medida que las plantas que van a ser utilizadas en la fitorremediación deben ser preferentemente especies nativas, contar con rendimiento de biomasa, una alta tolerancia y la capacidad de acumular los contaminantes en la parte aérea de las plantas, en otros (Jara-Peña *et al.*, 2017).

En contraparte, de acorde a la posibilidad de consumo de *S. fruticosa* debido a su potencial alimenticio, se encontró que se excedió los niveles establecidos en todos los metales citados por el Codex Alimentarius (As, Cd y Pb), al menos en dos zonas (Codex Alimentarius, 2018). Adicionalmente el As, Sb, Cr, Cu, Pb, Se, V y Zn excedieron al menos en una zona los niveles establecidos para consumo en una normativa consultada (MICT, 2017). Esta información resulta importante en la medida que el Codex Alimentarius solo contempla los rangos establecidos para As, Cd y Pb en suelos agrícolas (aplicado también en ANPs) y este bajo espectro brinda poca información sobre los riesgos de consumo de no solamente de la salicornia, sino de los diversos vegetales consumidos en el país.

Se encontró que solo en ZT1 los valores de metales pesados son los adecuados frente al Codex Alimentarius. Sin embargo, en ese punto el contenido de Pb en suelo excede la normativa vigente (ECA suelo), si bien el factor de Pb de *S. fruticosa* se correlaciona negativamente con la concentración en suelo de este metal, también se correlaciona positivamente con el factor de bioacumulación de Cu y Zn. Así mismo, la bioacumulación de Cu se correlaciona negativamente con su concentración y la del Pb en suelo, además la bioacumulación de Zn se correlaciona negativamente con su concentración y la del Pb en suelo. Cárdenas (2012) menciona que estos metales son absorbidos específicamente en cierto orden de preferencia por el suelo: $Cd < Zn < Cu < Pb$, además la absorción específica no es fácilmente

reversible, así mismo Peralta-Videa *et al.* (2009) refiere al hallazgo de una tendencia de traslocación: Cd>Zn>Cu>Pb>Hg, en un estudio de almacenamiento de Hg en vegetales afectados por una planta de fundición de Zn en China.

Otro factor importante en el control de la absorción del Pb por la planta, resultaría la materia orgánica debido a su capacidad de formar quelar metales pesados, donde el Pb forma quelatos solubles muy estables (Cárdenas, 2012). Resulta importante saber que las plantas no presentan canales en la raíz para absorción de Pb, en su lugar este elemento está unido a grupos carboxílicos de ácidos urónicos de mucílago en las superficies de las raíces (Peralta-Videa *et al.*, 2009). Peralta-Videa *et al.* (2009) mencionan que la raíz es considerada la primera barrera para la traslocación de Pb, por ende, un manejo adecuado de la absorción del Pb en este nivel resulta importante para controlar su concentración en el tallo y producto de ello, aprovechar su potencial para el consumo (Patel, 2016).

Otro valor que excede la concentración establecida en la normativa del Codex Alimentarius es el As en ZT2 y ZR1, donde la planta se comporta como tolerante. En valores altos de pH del suelo (6 -8), como los valores que presenta el suelo del ACR Humedales de Ventanilla, el As se encuentra altamente ligado al Ca, sin embargo, la presencia de Fe de óxidos de Mn incrementa la movilidad y disponibilidad en suelo del As (Peralta-Videa *et al.*, 2009). En el presente estudio, a pesar que no se halló correlación entre las concentraciones de suelo de Fe y Mn con la concentración en la planta o el factor de bioacumulación de As, si se encontró que las medias de las concentraciones de estos metales eran superiores a la media de la concentración de As en el suelo.

La concentración en suelo de As proveniente del ACR Humedales de Ventanilla se correlaciona negativamente con su concentración en la planta y su factor de bioacumulación, además, el factor de bioacumulación del As también se correlaciona negativamente con la concentración de Cu y Zn del suelo. Así mismo, el As entra a las células radicales vía

transportadores de fosfato (Geng et al., 2019). Se estima que la absorción de As por el tallo de *S. fruticosa* se relaciona fuertemente con los mecanismos que limitan la absorción de este metal por la planta y que también podría verse relacionado con el orden de preferencia de absorción de metales pesados citado anteriormente.

En relación al Cd se encontró que *S. fruticosa* se comporta como acumuladora en cinco zonas ((ZT1, ZR1, ZR2, ZS2 y ZS3), excediendo los niveles permisibles en el Codex Alimentarius en ZT3 y ZS2. En el presente estudio, la concentración en la planta de Cd se correlaciona positivamente con su factor de bioacumulación, mientras que la concentración en suelo de este metal no presenta correlación con su factor de bioacumulación. Peralta-Videa et al. (2009) menciona que factores externos como la concentración de Fe en suelo, reducen la captación de Cd por la planta. La presencia de altas concentraciones de Ca en el suelo también puede reducir la absorción de Cd debido a que existe una competencia iónica entre estos elementos (Cárdenas, 2012). Así también, Li et al. (2019) en un estudio realizado con granos de arroz para evaluar la bioacumulación de Cd, menciona que el pH es el factor clave en la biodisponibilidad del Cd y que un incremento del pH del suelo resulta en el decrecimiento de la movilidad y potencial disponibilidad del Cd a las plantas como resultado de su precipitación como carbonatos o hidróxidos o también puede conllevar a la transformación de Cd intercambiable en complejos precipitados de metal-carbonato y reduciendo su bioacumulación, además grupos funciones como carboxilos (RCOOH) y fenoles (ROH) en la materia orgánica forman complejos con Cd que reducen su transferencia en la planta. Así también, el Cd es altamente biodisponible en ecosistemas acuáticos (Geng et al., 2019), pero suelos inundados pueden conducir a la transformación de Cd soluble en especies CdS, resultando en la disminución de la solubilidad del Cd (Li et al., 2009).

VI. Conclusiones

La zonificación del ACR Humedales de Ventanilla no determina la concentración de metales pesados en el suelo superficial. Además, según los índices de contaminación evaluados (coeficiente de contaminación, factor de riesgo ecológico, índice de riesgo ecológico potencial, nuevo índice de contaminación, grado de contaminación y el índice de contaminación de Nemerow), se establece que el suelo superficial del ACR Humedales de Ventanilla presenta una baja contaminación por metales pesados y que solo en dos puntos analizados el Pb excedió el estándar el ECA suelo.

Se encontró que el comportamiento de bioacumulación del tallo de *S. fruticosa* es variable en todos los metales pesados analizados, salvo en el caso del Fe. Además, mayormente los diversos mecanismos que limitan la absorción de metales pesados preponderan sobre la concentración del metal pesado en el suelo. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos del suelo, se halló que la conductividad eléctrica y la materia orgánica se correlacionaron con los factores de bioacumulación de Co y Fe, respectivamente. Adicionalmente, se encontró cierta predilección por parte de *S. fruticosa* por absorber los metales pesados considerados esenciales que se encuentran en mayores concentraciones en el suelo.

Así mismo, de acorde a la posibilidad de consumo de *S. fruticosa* debido a su potencial alimenticio, se encontró que se excedió los niveles establecidos en todos los metales citados por el Codex Alimentarius (As, Cd y Pb), al menos en dos zonas (Codex Alimentarius, 2018).

VII. Recomendaciones

Dado que los valores de referencia pre industrial utilizados por Qingjie et al. (2018) siempre son mayores a las concentraciones de metales pesados en el sedimento del Rio Chillón utilizados en el estudio, el factor de contaminación y grado de contaminación resultan mayores en comparación a si la muestra se hubiera tomado en Estados Unidos u otros países. Resulta importante establecer valores de referencia preindustriales para los sedimentos de cuerpos de agua del Perú ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) a fin de obtener índices de contaminación de metales pesados más precisos y con ello realizar una correcta evaluación del grado de contaminación de las zonas a evaluar. También se requiere evaluar la deposición atmosférica total (TAD) de metales pesados en el ACR Humedales de Ventanilla y otras zonas de la región a fin de identificar la dinámica de entrada de metales pesados al suelo y determinar las fuentes de contaminación a fin de establecer medidas de control efectivas.

A pesar que el Pb en suelo solo excedió en dos zonas (ZT1 y ZS1) la normativa del ECA Suelo 2017, en tres zonas donde la planta presentaba un comportamiento exclusor (ZR2, ZR3 y ZS1) se excedió los niveles establecidos en el Codex Alimentarius. Adicionalmente, el As del suelo no excede la normativa establecida del suelo, pero si excede los niveles establecidos por el Codex Alimentarius en dos zonas donde *S. fruticosa* se comporta como tolerante (ZT2 y ZR1). En el caso del Cd, su contenido en suelo tampoco excede la normativa establecida y su contenido en la planta excede los niveles establecidos por el Codex Alimentarius en dos zonas (ZT3 y ZS1), donde la planta se comporta como acumuladora. Razón por la cual, se sugiere que se realice un ajuste en los niveles establecidos de As y Pb para suelo agrícola en el ECA Suelo 2017.

VIII. Referencias

- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J. & Hernández, Á. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74, 12–22.
- Aponte, H. & Cano, A. (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa central del Perú: Actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 3, 15–27.
- Aponte, H. & Ramírez, W. (2014). Riqueza florística y estado de conservación del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Callao, Perú. *The Biologist*, 12, 270-282.
- Alghobar, M.A. & Suresha, S. (2017). Evaluation of metal accumulation in soil and tomatoes irrigated with sewage water from Mysore city, Karnataka, India. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16, 49-59.
- Awashthi, S.K., (2000). Prevention of Food Adulteration Act no 37 of 1954. Central and State Rules as Amended for 1999. Ashoka Law House, New Delhi.
- Bassi, N., Kumar, M.D., Sharma, A. & Pardha-Saradhi, P. (2014). Status of wetlands in India: a review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 1–19.
- Bavandpour, F., Zou, Y., He, Y., Saeed, T., Sun, Y. & Sun. G. (2018). Removal of dissolved metals in wetland columns filled with Shell grits and plant biomass. *Chemical Engineering Journal*, 331, 234-241.
- Bonanno, G., Borg, J. & Di Martino, V. (2017). Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: A comparative assessment. *Science of the Total Environment*, 576: 796– 806.

- Bonanno, G., Vyzamal, J & Cirelli, G. (2018). Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetlands plants. *Science of the Total Environment*, 631-632, 252-261.
- Caeiro, S., Costa, H.M., Ramos, T.B., Fernandes, F., Silveira, N., Coimbra, A., Medeiros, G & Painho, M. (2005). Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecological Indicators*, 5, 151-169.
- Carazas, N., Gil, F., Camargo, L. & Zárate, R. (2016). Registros documentados de la Parihuana común (*Phoenicopterus chilensis*) en el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla (2008-2016). *Boletín UNOP*, 11, 19 -21.
- Cárdenas, A. (2012). *Presencia de Cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la cooperativa agraria industrial naranjillo – Tingo María – Perú*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María pp. 106 pp.
- Chui, H., Miramira, B., Olivera, P. & Jacay, H. (2009). Determinación de metales pesados en sedimentos del Río Chillón mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X. *Revista peruana de Química e Ingeniería Química*, 12, 9 -14.
- Codex Alimentarius. (2018). Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. Codex Stan 193-1995, pp.11-65.
- Danemann, G. & Ezcurra, E. (2007). *Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad Línea base 2007*. México.
- Decreto Supremo N° 011-2017- MINAM. Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (2 de diciembre de 2017). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental- eca-suelo-0>
- Decreto Supremo N° 004-2017- MINAM. Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y

establecen Disposiciones Complementarias (7 de junio de 2017).
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>

Delgadillo-López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 597-612.

Docampo, R. (2012). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. *INIA Serie Actividades de Difusión*, 687, 81-88.

Domínguez, M., Madrid, F., Marañón, T. & Murillo, J. (2008). Factores que condicionan la disponibilidad de elementos traza del suelo en repoblaciones forestales de la cuenca del Río Guadamar Sevilla. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 25, 167-172.

Esmaeilzadeh, M., Karbassi, A. & Bastami, K.D. (2017). Antioxidant response to metal pollution in *Phragmites australis* from Anzali wetland. *Marine Pollution Bulletin*, 119, 376-380.

Fajardo, N., Solís, H. & Gil, F. (2017). Determinación de metales pesados en los cuerpos de agua del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. *Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG – UNMSM*, 2039, 149–158.

FAO. 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. In: *FAO Land and Water Bulletin No. 8*. FAO, Roma. 214 pp

Geng, N., Wu, Y., Zhang, M., Tsang, D., Rinklebe., J., Xia, Y., Lu, D., Zhu, L., Niroshika, K., Kim, K & Sik, Y. (2019). Bioaccumulation of potentially toxic elements by submerged plants and biofilms: A critical review. *Environment International*, 131, 1–9.

Gobierno Regional del Callao GRC. (2009). *Plan Maestro 2009-2014 del Área de*

Conservación Regional Humedales de Ventanilla. Callao, Perú. GRC.

Gobierno Regional del Callao GRC. (2011). *Plan de Desarrollo Concertado 2011-2021*. Callao, Perú.

Gonzales- Alcaraz, M. N., Conesa, H.M., Tercero, M.C., Schulin, R., Álvarez- Rogel, J. & Egea, C. (2011). The combined use of liming and *Sarcocornia fruticosa* development for phytomanagement of salt marsh soils polluted by mine wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 805-813.

González-Alcaraz, M. N., Jiménez-Cárceles, F. J., Álvarez, Y. & Álvarez-Rogel, J. (2014). Gradients of soil salinity and moisture, and plant distribution, in a Mediterranean semiarid saline watershed: a model of soil–plant relationships for contributing to the management, *Catena*, 115, 150–158.

Hou, Q., Yang, Z., Ji, J., Yu, T., Chen, G., Li, J., Xia, X. & Zhang, M. Yuan, X. (2014). Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 139, 68–84.

Idaszkin, Y., Lancelotti, J., Pollicelli, M., Marcivecchio, J. & Bouza, P. (2017). Comparison of phytoremediation potential capacity of *Spartina densiflora* and *Sarcocornia perennis* for metal polluted soils. *Marine Pollution Bulletin*, 118, 297-306.

Indian Standard Institution (ISI). (1983). Specifications for Drinking and Irrigation Waters. IS: 10500. New Delhi, India.

Jara-Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Sánchez, T., Tapia, L., Cano, N. & Dextre, A. (2017). Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rigida* Kunth Trin. ex Steud. Poaceae y *Myriophyllum quitense* Kunth Haloragaceae evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*, 24, 583-598.

Kara, Y. (2005). Bioaccumulation of Cu, Zn and Ni from the wastewater by treated *Nasturtium*

- officinale*. *International Journal Environmental Science and Technology*, 2(1), 63-67.
- Khan, S., Ahmad, I., Tahir, M., Rehman, S. & Khaliq, A. (2009). Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Environmental Management*, 90, 3451–3457.
- Li, K., Cao, C., Ma, Y. & Li, J. (2019). Identification of cadmium bioaccumulation in rice *Oryza sativa* L. by the soil-plant transfer model and species sensitivity distribution, *Science of the Total Environment*, 692, 1022-1028.
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D. & Velásquez, H (2008). Contaminación por metales Pb, Zn, Ni y Cr en aire, sedimentos viales y suelo en una zona alta de alto tráfico vehicular. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24,171-182.
- Marasco, R., Mapelli, F., Rolli, E., Mosqueira, M., Fusi, M., Bariselli, P., Reddy, M., Cherif, A., Tsiamis, S. & Daffonchio, D. (2016). *Salicornia strobilacea* Synonym of *Halocnemum strobilaceum* grown under different tidal regimes selects rhizosphere bacteria capable of promoting plant growth. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1 -11.
- Medina, K & Montalvo, Y. (2014). *Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el Juncus arcticus Willd. y Cortaderia rudiusscula Staph, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental Minero Alianza – Ancash 2013*. Tesis para optar por el título en Ingeniería Ambiental. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Ancash pp. 1-99.
- Ministerio de Agricultura. (2018). Resolución Administrativa N°1429-2018- MINAGRI-SERFOR-ATFFS-LIMA. Lima, Perú.
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo MINCOTUR. (2017). Unión Europea. *Contenidos máximos en metales pesados en productos alimenticios*, Revisión Marzo

2017.

Ministerio del Ambiente MINAM. (2009). *Plan Director de las Áreas Naturales Protegidas* Estrategia Nacional. MINAM, Lima.

Nagajyoti, C.P., Lee, D.K. & Sreekanth, M.V.T. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemical Letters*, 8, 199–216.

Oyuela, M., Fernández-Gomez, W. & Guitérrez, M. (2017). Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands – A review. *Chemosphere*, 168,1230-1247.

Patel, S. (2016). Salicornia: evaluating the halophytic extremophile as a food and a pharmaceutical candidate. *Biotech*, 6,1-10.

Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Sánchez, T., Tapia, L., Cano, N & Dextre, A. (2017). Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rigida* Kunth Trin. ex Steud. Poaceae and *Myriophyllum quítense* Kunth Haloragaceae evaluated in four high Andean wetlands of Peru. *Arnaldoa*, 24, 583-598.

Peralta-Videa, J., Lopez, M., Narayan, M., Saupe, G., Torresdey-Gardea, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 41, 1665-1677.

Phillips, D.P., Human, L.R.D, Adams, J.B. (2015). Wetland plants as indicators of heavy metal contamination. *Marine Pollution Bulletin*, 92, 227-232.

Puga, S., Sosa, M., Lebgue, C., Quintana, C & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5, 149-155.

Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W. & Liqiang, &. (2008). Calculating Pollution Indices by Heavy Metals Ecological Geochemistry Assesment and a Case Study in

- Parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19, 230-241.
- Ramsar Convention Secretariat. (2004). The RAMSAR Convention manual: a guide to the Convention on Wetlands RAMSAR, Iran, 1971. RAMSAR Convention Secretariat. Gland Switzerland. 75 pp.
- Ramsar, (1971). Ramsar Convention of Wetlands of International Importance, Especially as Waterfowl Habitat, Ramsar, Iran.
- Ramachandra, T.V., Sudarshan, P.B., Mahesh, M.K. & Vinay, S. (2018). Spatial patterns of heavy metal accumulation in sediments and macrophytes of Bellandur wetland, Bangalore. *Journal of Environmental Management*, 206, 1204–1210.
- Redondo, S., Rubio-Casal, A.E., Castillo, J.M., Luque, C.J., Álvarez, A.A., Luque, T. & Figueroa, M.E. (2004). Influences of salinity and light on germination of three *Sarcocornia* taxa with contrasted habitats. *Aquatic Botany*, 78, 255-264.
- Riquelme, J., Olaeta, J., Gálvez, L., Undurraga, P., Fuentealba, C., Osses, A., Orellana, J., Gallardo, J. & Pedreschi, R. (2016). Nutritional and functional characterization of wild and cultivated *Sarcocornia neei* grown in Chile. *Revista Científica de Investigación Agraria*. 43, 283-293.
- Orimoloye, I.R., Kalumba, A.M., Mazinyo, S.P. & Nel, W. (2018). Geospatial Analysis of Wetland Dynamics: Wetland Depletion and Biodiversity Conservation of Isimangaliso Wetland, South Africa. *Journal of King Saud University – Science*: 10.1016/j.jksus.2018.03.004.
- Rossini-Oliva, S., Santos, E. & Abreu, M. M. (2019). Accumulation of Mn and Fe in aromatic plant species from the abandoned Rosalgar Mine and their potential risk to human health. *Applied Geochemistry*, 104, 42-50.
- Ruíz, B., Rodríguez, R. & Ipanaqué, J. (2013). Determinación de la acumulación de Metales

Tóxicos en agua, sedimento y biota del Humedal el Paraíso. *Infinitum*, 3, 57-63.

Sharma, S., Nagpal, A.K. & Kaur, I. (2018). Heavy metal contamination in soil, food crops and associated health risks for residents of Ropar Wetland, Punjab, India and its environs. *Food Chemistry*, 255, 15-22.

Solgi, E. & Galangashi M. (2018). Assessing the health of marine and lacustrine wetland using measurement of heavy metals in fish species: Case study from two Iranian international wetlands Gomishan and Zarivar. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 10, 73–78.

Su, C., Jiang, L. & Zhang, W. (2014). A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 3, 24-38.

Tang, C., Chen, Y., Zhang, Q., Li, J., Zhang, F. & Liu, Z. (2019). Effects of peat on plant growth and lead and zinc phytostabilization from lead-zinc mine tailing in southern China: Screening plant species resisting and accumulating metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 176, 42-49.

Torres, A.M., Barros, P.M., Campos, G.C.S., Pinto, E., Rajamani, S., Sayre, T.R. & Colepicolo, P. (2008). Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: a review. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 71, 1–15.

Tripathi, A. & Misra, D.R. (2013). Bioaccumulation of Pb, Ni and Zn in some plant species growing in and around a municipal waste dumpsite at Allahabad, India. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 39, 1 – 12.

Universidad Nacional Federico Villarreal^a. (2018). Código de ética para la investigación en la UNFV. Lima, Perú. 14 pp.

Universidad Nacional Federico Villarreal^b. (2018). Protocolo de seguridad para laboratorios y

- talleres Ingenierías, Arquitectura y Ciencias Naturales SSST-PS-02. Lima, Perú. 24 pp.
- Vinogradov, A.P. (1959). *Geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils translated from Russia Consultant Bureau*, New York, 209p.
- Vymazal, J. & Březinová, T. (2016). Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 290, 232-242.
- Wen, J., Li, Z., Luo, N., Huang, M., Yang, R. & Zeng, G. (2018). Investigating organic matter properties affecting the binding behavior of heavy metals in the rhizosphere of wetlands. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 184-191.
- Yang, J., Zheng, G., Yang, J., Wan, X., Song, B., Cai, W. & Guo, J. (2017). Phytoaccumulation of heavy metals Pb, Zn, and Cd by 10 wetlands plant species under different hydrological regimes. *Ecological Engineering*, 107, 56-64.
- Zagal, E. & Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Facultad de Agronomía Chillán, Universidad de Concepción.
- Zayed, A.; Gowthaman, S.Y. & Terry, N. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I Duckweed. *Journal of Environmental Quality*, 27, 715-721.
- Zhang, G., Bai, J., Zhao, Q., Jia, J. & Wen, X. (2017). Heavy metals pollution in soil profiles seasonal-flooding riparian wetlands in a Chinese delta: Levels, distributions and toxic risks. *Physics and Chemistry of the Earth*, 97, 54-61.
- Zhang, S., Bai, J., Wang, W., Huang, L., Zhang, G. & Wang, D. (2018). Heavy metal contents and transfer capacities of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 104, 3-8.

IX. Anexos

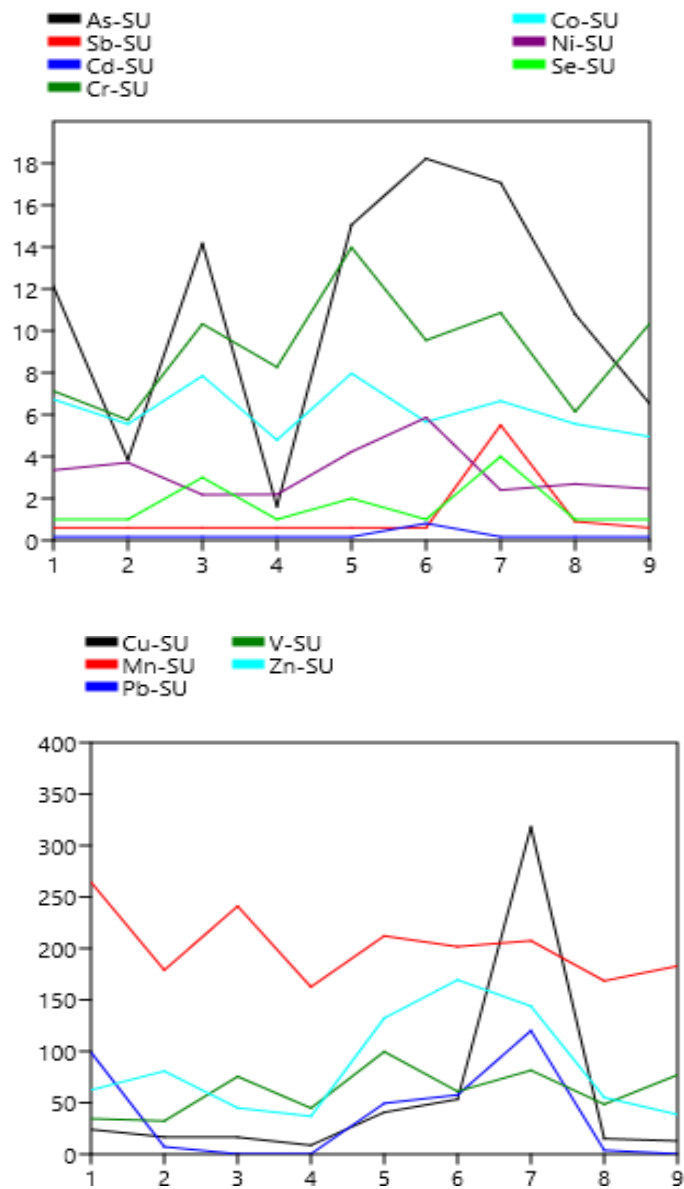


Figura 6. Variación en las concentraciones de metales pesados en el suelo del ACR Humedales de Ventanilla ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). SU= Suelo.

Figura 7

Distribución en barras del comportamiento de acumulación de metales pesados por parte del tallo de S. fruticosa del ACR Humedales de Ventanilla en número de ejemplares.

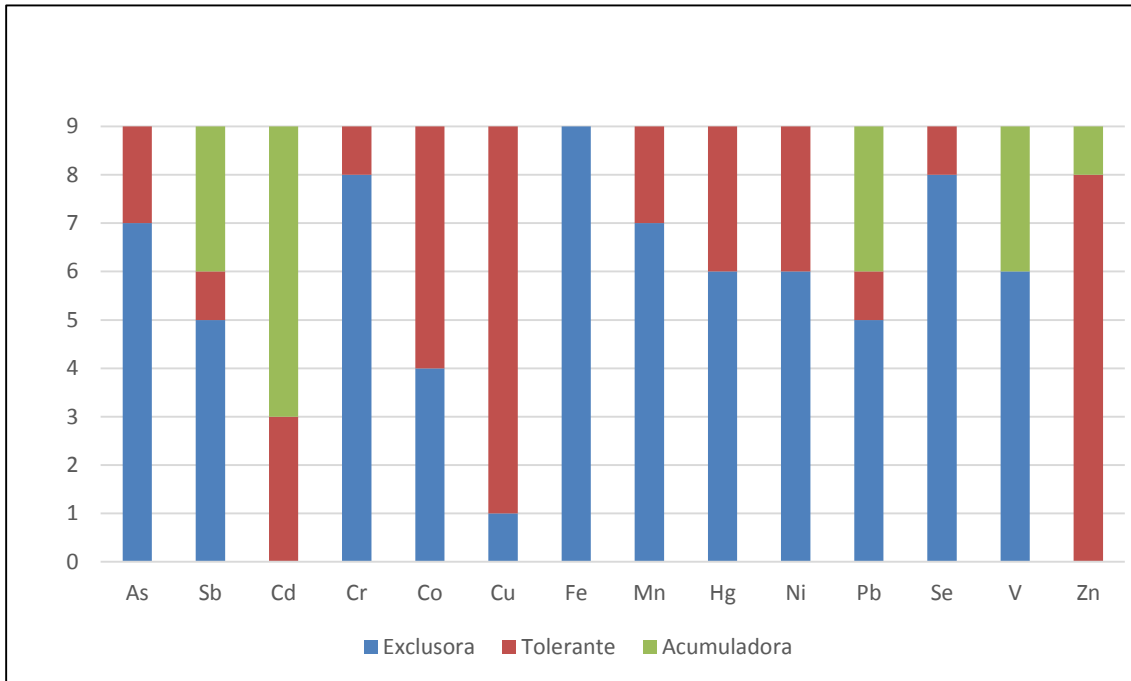


Tabla 10

Valores de estadística básica de los metales pesados del suelo del ACR Humedales de Ventanilla. SU= Suelo, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo, E.E.=Error estándar, Var=Varianza, D.E.=Desviación Estándar, Med= Mediana, O.=Oblicuidad, Cur.=Curtosis, M.G.=Media geométrica, C.V. =Coeficiente de variación.

	As- SU	Sb-SU	Cd- SU	Co- SU	Cr- SU	Cu-SU	Fe-SU	Mn-SU	Ni- SU	Pb-SU	Se- SU	V-SU	Zn-SU
Mín	1.62	0.6	0.17	4.79	5.75	8.74	12291	162.6	2.18	0.3	1	32.36	36.86
Max	18.22	5.5	0.81	7.97	13.98	318	25593	264.5	5.86	120	4	99.69	169.4
Suma	99.42	10.60	2.17	55.70	82.36	506.37	161979	1819.90	29.07	338.30	15.00	555.27	764.48
Media	11.05	1.18	0.24	6.19	9.15	56.26	17997.7	202.21	3.23	37.59	1.67	61.70	84.94
E.E.	1.96	0.54	0.07	0.39	0.87	33.07	1496.4	11.27	0.41	15.52	0.37	7.75	16.80
Var	34.52	2.64	0.05	1.38	6.84	9844.45	2.015	1142.76	1.49	2168.92	1.25	539.87	2539.06
D. E	5.88	1.62	0.21	1.17	2.62	99.22	4489	33.80	1.22	46.57	1.12	23.24	50.39
Med	12.13	0.60	0.17	5.65	9.55	16.76	16885	201.70	2.69	7.20	1.00	61.05	62.42
25 p	5.18	0.60	0.17	5.25	6.64	14.05	14275.5	173.70	2.30	0.30	1.00	39.72	41.84
75 p	16.07	0.75	0.17	7.29	10.61	47.09	21363	226.65	3.97	78.40	2.50	79.35	138.10
O.	-0.49	2.98	3.00	0.52	0.41	2.88	0.38	0.75	1.40	0.92	1.53	0.21	0.76
Cur.	-1.12	8.90	9.00	-1.13	-0.05	8.45	-1.10	-0.15	1.73	-0.67	1.26	-1.15	-1.18
M.G.	8.91	0.80	0.20	6.09	8.82	27.11	17508.1	199.81	3.06	6.66	1.42	57.66	72.81
C.V.	53.18	137.88	88.48	18.97	28.58	176.35	24.94	16.72	37.79	123.90	67.08	37.66	59.32

Tabla 11

Valores de estadística básica de los metales pesados del tallo de S. fruticosa del ACR Humedales de Ventanilla. PL= Planta, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo, E.E.=Error estándar, Var=Varianza, D.E.=Desviación Estándar, Med= Mediana O.=Oblicuidad, Cur=Curtosis, M.G.=Media geométrica, C.V. =Coeficiente de variación.

	As-PL	Sb-PL	Cd- PL	Co- PL	Cr- PL	Cu-PL	Fe-PL	Hg-PL	Mn-PL	Ni-PL	Pb- PL	Se-PL	V-PL	Zn-PL
Min	0.03	0.02	0.13	0.26	0.10	5.83	61.00	0.00	12.03	0.02	0.02	0.04	0.33	20.93
Max	1.59	2.75	0.59	1.32	1.01	21.10	170.00	0.03	22.54	1.40	8.22	0.59	1.83	76.82
Suma	3.48	5.20	3.12	6.51	4.18	109.60	890.00	0.10	143.46	2.85	32.50	0.96	8.83	385.04
Media	0.39	0.58	0.35	0.72	0.46	12.18	98.89	0.01	15.94	0.32	3.61	0.11	0.98	42.78
E.E.	0.23	0.32	0.05	0.14	0.09	1.58	14.13	0.00	1.39	0.16	0.99	0.06	0.18	5.92
Var	0.46	0.90	0.02	0.17	0.07	22.56	1796.11	0.00	17.35	0.22	8.78	0.03	0.29	315.82
D. E	0.68	0.95	0.16	0.41	0.26	4.75	42.38	0.01	4.17	0.47	2.96	0.18	0.54	17.77
Med.	0.03	0.02	0.35	0.59	0.49	12.26	76.00	0.00	14.51	0.07	3.72	0.04	0.96	41.91
25 p	0.03	0.02	0.20	0.34	0.26	7.90	67.50	0.00	12.32	0.02	0.55	0.04	0.50	27.15
75 p	0.87	1.12	0.47	1.11	0.55	14.98	145.50	0.03	19.91	0.58	6.08	0.07	1.49	54.20
O.	1.60	1.85	0.15	0.40	0.91	0.45	0.89	0.92	0.60	1.84	0.28	2.95	0.52	0.74
Cur	0.70	3.09	-0.80	-1.53	2.04	0.40	-1.15	-1.42	-1.37	3.24	-0.96	8.78	-0.97	0.42
M.G.	0.08	0.10	0.31	0.62	0.39	11.32	91.78	0.01	15.48	0.09	1.22	0.06	0.85	39.59
C.V.	175.57	164.48	45.32	56.56	55.64	39.00	42.86	122.54	26.13	149.49	82.05	170.63	54.82	41.54

Tabla 12

Valores de estadística básica de la bioacumulación del tallo de S. fruticosa del ACR Humedales de Ventanilla. BIO=Factor de Bioacumulación, Min=Valor mínimo, Max=Valor máximo, E.E.=Error estándar, Var=Varianza, D.E.=Desviación Estándar, Med = Mediana, O.=Oblicuidad, Cur=Curtosis, M.G.=Media geométrica, C.V. =Coeficiente de variación.

	BIO-As	BIO-Sb	BIO-Cd	BIO-Co	BIO-Cr	BIO-Cu	BIO-Fe	BIO-Hg	BIO-Mn	BIO-Ni	BIO-Pb	BIO-Se	BIO-V	BIO-Zn
Min	0.00	0.00	0.48	0.05	0.01	0.07	0.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.25
Max	0.98	4.59	3.44	0.19	0.14	0.98	0.01	1.15	0.12	0.64	27.40	0.15	22.45	1.70
Suma	1.42	8.62	16.57	1.02	0.51	4.99	0.05	3.48	0.72	1.20	42.10	0.45	59.99	5.84
Media	0.16	0.96	1.84	0.11	0.06	0.55	0.00	0.39	0.08	0.13	4.68	0.05	6.67	0.65
E.E.	0.11	0.53	0.35	0.02	0.01	0.12	0.00	0.16	0.01	0.07	3.14	0.01	3.37	0.15
Var	0.11	2.52	1.11	0.00	0.00	0.12	0.00	0.22	0.00	0.05	88.91	0.00	102.09	0.20
D. E	0.34	1.59	1.05	0.05	0.04	0.35	0.00	0.47	0.02	0.22	9.43	0.04	10.10	0.45
Med	0.00	0.04	1.99	0.11	0.05	0.67	0.00	0.07	0.08	0.01	0.07	0.04	0.02	0.57
25 p	0.00	0.03	0.85	0.06	0.03	0.22	0.00	0.07	0.06	0.00	0.05	0.04	0.01	0.32
75 p	0.22	1.86	2.76	0.16	0.08	0.89	0.01	0.95	0.10	0.24	7.15	0.04	18.73	0.79
O.	2.31	1.84	0.31	0.11	1.27	-0.15	0.70	0.92	0.31	1.98	2.22	2.62	0.95	1.81
Cur	5.18	3.07	-1.10	-1.75	1.80	-1.81	-0.22	-1.42	-0.22	3.96	4.68	7.63	-1.33	3.90
M.G.	0.01	0.13	1.54	0.10	0.04	0.42	0.01	0.18	0.08	0.01	0.18	0.04	0.15	0.54
C.V.	212.21	165.64	57.27	47.00	70.20	62.71	26.16	122.66	27.42	162.09	201.60	76.59	151.59	69.37

Tabla 13

Correlación de Spearman's rs entre las variables analizadas en el ACR Humedales de Ventanilla. C.E.=Conductividad eléctrica, H2O=Contenido de agua, M.O.=Materia orgánica, SU= Suelo, PL= Planta, BIO= Factor de Bioacumulación, Z = Zonificación.

	pH	CE	H2O	MO	As-SU	Sb-SU	Cd-SU
pH		0,011	0,031	0,031	0,359	0,556	0,444
C.E.	0,800		0,313	0,250	0,463	0,556	0,444
H2O	-0,717	-0,383		0,006	0,463	0,889	0,889
M.O.	-0,733	-0,417	0,850		0,776	0,944	0,889
As-SU	0,333	0,283	-0,267	0,100		0,583	0,444
Sb-SU	0,274	0,274	-0,068	0,046	0,251		1,000
Cd-SU	0,548	0,548	-0,137	-0,137	0,548	-0,188	
Co-SU	-0,117	-0,033	-0,200	0,233	0,717	0,023	0,000
Cr-SU	-0,217	-0,583	-0,050	0,250	0,550	0,068	0,000
Cu-SU	0,217	0,317	-0,133	0,067	0,850	0,274	0,411
Fe-SU	-0,283	-0,567	0,083	0,433	0,550	0,046	0,000
Mn-SU	-0,017	0,000	-0,367	0,033	0,617	-0,160	0,000
Ni-SU	0,400	0,383	-0,350	-0,483	0,333	-0,228	0,548
Pb-SU	0,288	0,424	-0,288	-0,153	0,644	0,371	0,279
Se-SU	-0,386	-0,366	0,287	0,644	0,554	0,380	-0,244
V-SU	-0,067	-0,467	-0,117	0,183	0,583	0,251	0,000
Zn-SU	0,333	0,433	-0,117	-0,033	0,783	0,251	0,548
As-PL	-0,386	-0,376	0,495	0,050	-0,842	-0,366	-0,244
Sb-PL	-0,055	-0,037	-0,164	0,146	0,657	-0,450	0,450
Cd-PL	0,433	0,167	-0,383	-0,117	0,383	0,160	0,137
Co-PL	-0,567	-0,700	0,117	0,433	0,183	-0,046	-0,548
Cr-PL	-0,283	-0,033	-0,167	0,167	0,233	0,091	-0,411
Cu-PL	-0,050	-0,183	0,050	0,317	0,483	0,548	-0,274
Fe-PL	-0,393	-0,552	0,226	0,477	0,159	0,344	-0,550
Hg-PL	-0,040	-0,287	0,020	0,218	0,139	0,108	-0,244
Mn-PL	0,183	-0,200	-0,450	-0,267	0,350	-0,342	0,137
Ni-PL	-0,104	-0,313	0,218	0,366	0,087	0,000	0,000
Pb-PL	0,343	0,243	-0,050	0,201	0,485	0,504	0,138
Se-PL	-0,274	-0,365	0,114	0,320	0,525	0,500	-0,188
V-PL	0,067	-0,150	-0,100	0,117	0,283	0,548	-0,411
Zn-PL	-0,133	0,033	0,383	0,467	0,400	0,137	0,000
BIO-As	-0,498	-0,472	0,367	0,009	-0,953	-0,467	-0,503
BIO-Sb	-0,153	-0,153	-0,085	0,085	0,373	-0,743	0,418
BIO-Cd	-0,017	-0,233	-0,233	0,017	0,017	0,274	-0,548
BIO-Co	-0,467	-0,800	0,050	0,217	-0,083	-0,160	-0,548
BIO-Cr	0,000	0,400	-0,117	-0,033	-0,100	0,274	-0,411
BIO-Cu	-0,133	-0,250	0,083	0,000	-0,550	-0,274	-0,411
BIO-Fe	-0,550	-0,283	0,567	0,700	0,050	0,342	-0,548
BIO-Hg	-0,040	-0,287	0,020	0,218	0,139	0,108	-0,244

	pH	CE	H2O	MO	As-SU	Sb-SU	Cd-SU
BIO-Mn	0,200	-0,267	-0,217	-0,233	0,100	-0,251	0,274
BIO-Ni	0,050	-0,126	0,084	0,243	0,042	0,092	0,000
BIO-Pb	0,150	0,000	0,117	0,017	-0,267	-0,160	0,000
BIO-Se	-0,069	-0,208	-0,050	-0,030	0,337	0,488	-0,081
BIO-V	0,333	0,167	-0,250	-0,167	0,100	0,730	-0,411
BIO-Zn	-0,150	-0,183	0,150	0,033	-0,617	-0,137	-0,548
Z	0,369	-0,053	-0,264	-0,264	0,105	0,650	0,000

	Co-SU	Cr-SU	Cu-SU	Fe-SU	Mn-SU	Ni-SU	Pb-SU	Se-SU	V-SU	Zn-SU
pH	0,744	0,552	0,552	0,463	0,948	0,270	0,455	0,337	0,843	0,359
C.E.	0,912	0,097	0,385	0,121	1,000	0,313	0,259	0,373	0,194	0,230
H2O	0,581	0,880	0,708	0,810	0,336	0,359	0,455	0,476	0,744	0,744
M.O.	0,521	0,521	0,843	0,230	0,912	0,194	0,705	0,091	0,644	0,912
As-SU	0,031	0,133	0,006	0,133	0,076	0,359	0,071	0,159	0,097	0,014
Sb-SU	1,000	0,889	0,556	0,944	0,750	0,583	0,417	0,583	0,583	0,583
Cd-SU	1,000	1,000	0,444	1,000	1,000	0,444	0,667	1,000	1,000	0,444
Co-SU		0,213	0,067	0,133	0,003	0,644	0,221	0,091	0,213	0,194
Cr-SU	0,450		0,359	0,000	0,250	0,744	0,771	0,071	0,000	0,581
Cu-SU	0,633	0,350		0,521	0,121	0,178	0,002	0,226	0,359	0,000
Fe-SU	0,533	0,933	0,250		0,270	0,552	0,874	0,040	0,000	0,744
Mn-SU	0,867	0,417	0,567	0,400		0,810	0,221	0,202	0,385	0,359
Ni-SU	0,183	-0,117	0,500	-0,217	0,083		0,169	0,373	0,810	0,050
Pb-SU	0,458	0,119	0,898	-0,068	0,458	0,509		0,573	0,841	0,007
Se-SU	0,654	0,693	0,485	0,762	0,515	-0,366	0,242		0,071	0,476
V-SU	0,450	0,950	0,333	0,933	0,317	-0,083	0,085	0,693		0,521
Zn-SU	0,483	0,200	0,950	0,117	0,350	0,683	0,848	0,287	0,233	
As-PL	-0,822	-0,327	-0,644	-0,396	-0,683	-0,218	-0,544	-0,476	-0,436	-0,554
Sb-PL	0,767	0,402	0,475	0,493	0,657	0,456	0,241	0,260	0,347	0,438
Cd-PL	0,333	0,267	-0,050	0,467	0,233	-0,133	-0,288	0,248	0,467	-0,050
Co-PL	0,567	0,700	0,083	0,733	0,600	-0,483	-0,102	0,782	0,617	-0,167
Cr-PL	0,783	0,017	0,283	0,100	0,650	0,017	0,339	0,386	0,017	0,133
Cu-PL	0,533	0,567	0,367	0,667	0,333	-0,250	0,119	0,842	0,717	0,267
Fe-PL	0,385	0,611	0,000	0,728	0,251	-0,577	-0,230	0,825	0,686	-0,159
Hg-PL	0,129	0,495	-0,099	0,554	0,307	-0,663	-0,322	0,559	0,495	-0,277
Mn-PL	0,467	0,483	0,050	0,567	0,400	0,300	-0,203	0,129	0,567	0,067
Ni-PL	-0,113	0,479	-0,200	0,531	0,078	-0,714	-0,416	0,419	0,418	-0,348
Pb-PL	0,301	0,259	0,159	0,469	0,117	-0,268	-0,102	0,507	0,477	0,151
Se-PL	0,479	0,707	0,639	0,593	0,297	0,046	0,557	0,759	0,707	0,525
V-PL	0,333	0,467	0,167	0,517	0,300	-0,433	0,000	0,703	0,600	0,033
Zn-PL	0,483	0,183	0,450	0,350	0,317	0,000	0,119	0,644	0,267	0,433
BIO-As	-0,621	-0,393	-0,813	-0,385	-0,533	-0,262	-0,694	-0,483	-0,472	-0,752
BIO-Sb	0,542	0,271	0,220	0,356	0,509	0,458	0,000	0,020	0,170	0,220
BIO-Cd	0,350	0,267	-0,250	0,433	0,250	-0,450	-0,373	0,426	0,433	-0,350
BIO-Co	0,183	0,683	-0,233	0,667	0,317	-0,550	-0,390	0,515	0,600	-0,433
BIO-Cr	0,333	-0,567	0,100	-0,483	0,267	-0,017	0,288	0,020	-0,500	0,050
BIO-Cu	-0,217	-0,200	-0,767	0,017	-0,217	-0,433	-0,881	-0,149	-0,100	-0,733
BIO-Fe	0,400	0,133	0,150	0,300	0,200	-0,450	-0,017	0,753	0,183	0,033
BIO-Hg	0,129	0,495	-0,099	0,554	0,307	-0,663	-0,322	0,559	0,495	-0,277
BIO-Mn	-0,067	0,417	-0,233	0,483	-0,200	0,233	-0,458	-0,119	0,533	-0,100
BIO-Ni	-0,176	0,310	-0,259	0,360	0,059	-0,762	-0,392	0,298	0,268	-0,410
BIO-Pb	-0,267	-0,133	-0,550	0,100	-0,300	-0,300	-0,780	-0,109	0,017	-0,450
BIO-Se	0,158	0,475	0,564	0,248	0,020	0,307	0,645	0,341	0,475	0,545
BIO-V	0,067	0,100	0,083	0,100	0,067	-0,350	0,085	0,386	0,283	0,017
BIO-Zn	-0,300	-0,283	-0,700	-0,133	-0,167	-0,617	-0,746	-0,069	-0,233	-0,733
Z	-0,316	0,369	-0,053	0,264	-0,422	-0,105	0,000	0,063	0,527	0,000

	As-PL	Sb-PL	Cd-PL	Co-PL	Cr-PL	Cu-PL	Fe-PL
pH	0,337	0,900	0,230	0,121	0,463	0,880	0,295
C.E.	0,357	0,939	0,644	0,043	0,912	0,644	0,128
H2O	0,226	0,680	0,313	0,744	0,644	0,880	0,558
M.O.	0,901	0,715	0,744	0,230	0,644	0,385	0,198
As-SU	0,024	0,075	0,313	0,644	0,521	0,194	0,683
Sb-SU	0,583	0,417	0,750	0,944	0,833	0,222	0,458
Cd-SU	1,000	0,222	0,889	0,444	0,444	0,667	0,444
Co-SU	0,028	0,031	0,359	0,121	0,014	0,133	0,305
Cr-SU	0,417	0,292	0,463	0,043	0,948	0,121	0,087
Cu-SU	0,091	0,228	0,880	0,810	0,463	0,336	1,000
Fe-SU	0,337	0,202	0,194	0,031	0,776	0,050	0,031
Mn-SU	0,075	0,075	0,521	0,086	0,059	0,359	0,512
Ni-SU	0,603	0,240	0,708	0,194	0,948	0,521	0,110
Pb-SU	0,177	0,533	0,455	0,806	0,373	0,771	0,549
Se-SU	0,393	0,504	0,563	0,036	0,337	0,024	0,028
V-SU	0,282	0,368	0,194	0,076	0,948	0,031	0,047
Zn-SU	0,159	0,269	0,880	0,644	0,708	0,463	0,683
As-PL		0,196	0,147	0,603	0,143	0,194	0,581
Sb-PL	-0,586		0,476	0,507	0,292	0,834	0,975
Cd-PL	-0,564	0,274		0,552	0,880	0,121	0,215
Co-PL	-0,218	0,256	0,217		0,230	0,076	0,009
Cr-PL	-0,584	0,420	0,050	0,433		0,463	0,528
Cu-PL	-0,525	0,091	0,567	0,617	0,267		0,003
Fe-PL	-0,229	-0,018	0,460	0,828	0,243	0,879	
Hg-PL	-0,106	-0,108	0,545	0,663	-0,139	0,604	0,736
Mn-PL	-0,406	0,621	0,700	0,350	0,117	0,350	0,301
Ni-PL	0,098	-0,124	0,366	0,470	-0,409	0,322	0,520
Pb-PL	-0,562	0,083	0,854	0,192	0,000	0,762	0,584
Se-PL	-0,366	0,150	-0,114	0,502	0,274	0,639	0,527
V-PL	-0,386	-0,164	0,583	0,617	0,150	0,917	0,862
Zn-PL	-0,307	0,237	0,333	0,367	0,183	0,717	0,544
BIO-As	0,883	-0,460	-0,411	-0,052	-0,236	-0,481	-0,114
BIO-Sb	-0,272	0,928	0,153	0,186	0,254	-0,153	-0,153
BIO-Cd	-0,366	-0,018	0,750	0,583	0,367	0,700	0,778
BIO-Co	0,099	0,018	0,233	0,883	0,050	0,450	0,753
BIO-Cr	-0,317	-0,091	-0,067	-0,033	0,750	0,067	-0,033
BIO-Cu	0,297	-0,201	0,500	0,200	-0,083	0,117	0,360
BIO-Fe	-0,139	-0,073	0,083	0,583	0,450	0,700	0,745
BIO-Hg	-0,106	-0,108	0,545	0,663	-0,139	0,604	0,736
BIO-Mn	-0,010	0,292	0,567	0,017	-0,400	0,150	0,159
BIO-Ni	0,050	-0,229	0,393	0,343	-0,377	0,234	0,412
BIO-Pb	0,188	-0,146	0,667	0,000	-0,383	0,217	0,301
BIO-Se	-0,159	-0,043	-0,366	0,109	0,069	0,287	0,129
BIO-V	-0,297	-0,475	0,467	0,250	0,067	0,717	0,586
BIO-Zn	0,386	-0,456	0,317	0,250	-0,100	0,133	0,385
Z	-0,063	-0,404	0,264	-0,105	-0,422	0,316	0,238

	Hg-PL	Mn-PL	Ni-PL	Pb-PL	Se-PL	V-PL	Zn-PL
pH	0,925	0,644	0,789	0,363	0,556	0,843	0,708
C.E.	0,476	0,581	0,410	0,527	0,417	0,678	0,912
H2O	0,976	0,213	0,571	0,904	0,778	0,776	0,313
M.O.	0,603	0,463	0,330	0,602	0,500	0,744	0,194
As-SU	0,746	0,359	0,825	0,187	0,250	0,463	0,270
Sb-SU	0,917	0,444	1,000	0,278	0,125	0,222	0,750
Cd-SU	1,000	0,889	1,000	0,889	1,000	0,444	1,000
Co-SU	0,766	0,194	0,771	0,427	0,278	0,359	0,194
Cr-SU	0,226	0,194	0,201	0,497	0,083	0,194	0,644
Cu-SU	0,813	0,880	0,603	0,683	0,139	0,644	0,213
Fe-SU	0,159	0,121	0,152	0,204	0,167	0,162	0,359
Mn-SU	0,460	0,270	0,845	0,766	0,500	0,410	0,385
Ni-SU	0,083	0,410	0,042	0,481	0,944	0,230	1,000
Pb-SU	0,437	0,606	0,274	0,795	0,194	1,000	0,771
Se-SU	0,357	0,766	0,292	0,198	0,083	0,063	0,091
V-SU	0,226	0,121	0,271	0,197	0,083	0,086	0,463
Zn-SU	0,492	0,843	0,355	0,700	0,250	0,912	0,230
As-PL	0,821	0,321	0,810	0,163	0,583	0,337	0,460
Sb-PL	0,881	0,093	0,753	0,836	0,722	0,680	0,547
Cd-PL	0,171	0,043	0,330	0,005	0,778	0,097	0,359
Co-PL	0,083	0,359	0,210	0,619	0,278	0,076	0,336
Cr-PL	0,746	0,744	0,281	1,000	0,556	0,678	0,644
Cu-PL	0,131	0,359	0,394	0,022	0,139	0,001	0,031
Fe-PL	0,060	0,428	0,160	0,103	0,250	0,004	0,135
Hg-PL		0,492	0,014	0,151	0,917	0,036	0,337
Mn-PL	0,277		0,845	0,363	1,000	0,463	0,552
Ni-PL	0,879	0,078		0,239	1,000	0,210	0,652
Pb-PL	0,577	0,343	0,441		0,764	0,034	0,110
Se-PL	0,108	0,023	0,000	0,138		0,278	0,500
V-PL	0,782	0,283	0,470	0,720	0,456		0,121
Zn-PL	0,396	0,217	0,174	0,577	0,320	0,567	
BIO-As	-0,125	-0,201	-0,050	-0,558	-0,467	-0,341	-0,324
BIO-Sb	-0,151	0,627	-0,115	-0,136	-0,093	-0,356	0,119
BIO-Cd	0,614	0,517	0,287	0,636	0,091	0,783	0,317
BIO-Co	0,753	0,400	0,627	0,109	0,297	0,567	0,133
BIO-Cr	-0,248	-0,283	-0,522	0,000	-0,091	0,083	0,167
BIO-Cu	0,426	0,367	0,296	0,285	-0,548	0,267	0,133
BIO-Fe	0,376	-0,133	0,165	0,393	0,434	0,600	0,750
BIO-Hg	1,000	0,277	0,879	0,577	0,108	0,782	0,396
BIO-Mn	0,149	0,783	0,174	0,293	-0,068	0,083	-0,033
BIO-Ni	0,845	-0,025	0,961	0,458	-0,138	0,444	0,050
BIO-Pb	0,495	0,400	0,444	0,561	-0,525	0,317	0,317
BIO-Se	-0,241	-0,129	-0,284	-0,169	0,868	0,149	-0,030
BIO-V	0,564	0,033	0,244	0,628	0,274	0,883	0,367
BIO-Zn	0,564	0,067	0,409	0,226	-0,502	0,383	0,183
Z	0,157	0,053	0,193	0,344	0,361	0,369	-0,264

	BIO-As	BIO-Sb	BIO-Cd	BIO-Co	BIO-Cr	BIO-Cu	BIO-Fe	BIO-Hg
pH	0,188	0,707	0,948	0,194	1,000	0,708	0,133	0,925
C.E.	0,214	0,707	0,521	0,011	0,270	0,521	0,463	0,476
H2O	0,329	0,842	0,521	0,880	0,744	0,810	0,121	0,976
M.O.	0,995	0,842	0,948	0,552	0,912	1,000	0,043	0,603
As-SU	0,001	0,327	0,948	0,810	0,776	0,133	0,880	0,746
Sb-SU	0,389	0,069	0,556	0,750	0,556	0,556	0,444	0,917
Cd-SU	0,444	0,444	0,444	0,444	0,444	0,444	0,444	1,000
Co-SU	0,086	0,140	0,359	0,644	0,359	0,552	0,270	0,766
Cr-SU	0,306	0,484	0,463	0,050	0,121	0,581	0,708	0,226
Cu-SU	0,012	0,575	0,521	0,521	0,776	0,021	0,678	0,813
Fe-SU	0,320	0,354	0,230	0,050	0,194	0,948	0,410	0,159
Mn-SU	0,153	0,171	0,521	0,385	0,463	0,552	0,581	0,460
Ni-SU	0,492	0,224	0,213	0,133	0,948	0,230	0,213	0,083
Pb-SU	0,054	1,000	0,323	0,302	0,455	0,003	0,981	0,437
Se-SU	0,242	0,958	0,294	0,202	0,976	0,726	0,044	0,357
V-SU	0,214	0,670	0,230	0,086	0,178	0,776	0,644	0,226
Zn-SU	0,026	0,575	0,359	0,230	0,880	0,031	0,912	0,492
As-PL	0,012	0,510	0,373	0,813	0,440	0,476	0,746	0,821
Sb-PL	0,244	0,002	0,985	0,985	0,834	0,611	0,870	0,881
Cd-PL	0,287	0,707	0,025	0,521	0,843	0,178	0,810	0,171
Co-PL	0,898	0,640	0,097	0,002	0,912	0,581	0,097	0,083
Cr-PL	0,536	0,517	0,336	0,880	0,025	0,810	0,213	0,746
Cu-PL	0,203	0,707	0,043	0,213	0,843	0,744	0,043	0,131
Fe-PL	0,768	0,695	0,018	0,024	0,937	0,340	0,026	0,060
Hg-PL	0,813	0,718	0,119	0,044	0,563	0,294	0,357	0,012
Mn-PL	0,603	0,079	0,162	0,270	0,463	0,336	0,708	0,492
Ni-PL	0,903	0,770	0,450	0,083	0,159	0,437	0,668	0,014
Pb-PL	0,135	0,730	0,072	0,783	1,000	0,453	0,294	0,151
Se-PL	0,389	0,806	0,833	0,500	0,833	0,222	0,306	0,917
V-PL	0,367	0,354	0,014	0,121	0,810	0,463	0,086	0,036
Zn-PL	0,398	0,772	0,385	0,708	0,644	0,708	0,025	0,337
BIO-As		0,737	0,884	0,584	0,898	0,130	0,938	0,813
BIO-Sb	-0,133		0,772	0,874	0,607	0,982	0,607	0,718
BIO-Cd	-0,061	-0,119		0,121	0,521	0,059	0,194	0,119
BIO-Co	0,210	0,068	0,567		0,359	0,270	0,385	0,044
BIO-Cr	-0,052	-0,203	0,233	-0,333		0,912	0,250	0,563
BIO-Cu	0,560	-0,017	0,650	0,400	0,033		0,581	0,294
BIO-Fe	-0,035	-0,203	0,467	0,317	0,417	0,200		0,357
BIO-Hg	-0,125	-0,151	0,614	0,753	-0,248	0,426	0,376	
BIO-Mn	0,026	0,373	0,283	0,267	-0,667	0,383	-0,350	0,149
BIO-Ni	-0,079	-0,238	0,301	0,502	-0,377	0,301	0,084	0,845
BIO-Pb	0,271	-0,017	0,517	0,217	-0,200	0,867	0,117	0,495
BIO-Se	-0,327	-0,222	-0,208	0,020	-0,139	-0,703	0,059	-0,241
BIO-V	-0,280	-0,661	0,667	0,250	0,283	0,217	0,433	0,564
BIO-Zn	0,568	-0,288	0,583	0,433	0,167	0,900	0,333	0,564
Z	-0,221	-0,536	0,211	0,105	-0,422	-0,105	-0,211	0,157

	BIO-Mn	BIO-Ni	BIO-Pb	BIO-Se	BIO-V	BIO-Zn	Z
pH	0,581	0,904	0,678	0,861	0,359	0,678	0,355
C.E.	0,463	0,751	1,000	0,627	0,644	0,644	0,955
H2O	0,552	0,834	0,744	0,909	0,521	0,678	0,529
M.O.	0,521	0,528	0,948	0,948	0,644	0,912	0,529
As-SU	0,776	0,922	0,463	0,429	0,776	0,076	0,833
Sb-SU	0,583	0,875	0,750	0,278	0,083	0,750	0,167
Cd-SU	0,667	1,000	1,000	1,000	0,444	0,444	1,000
Co-SU	0,843	0,653	0,463	0,706	0,843	0,410	0,436
Cr-SU	0,250	0,416	0,708	0,234	0,776	0,463	0,355
Cu-SU	0,521	0,498	0,133	0,151	0,810	0,043	0,955
Fe-SU	0,194	0,340	0,776	0,560	0,776	0,708	0,529
Mn-SU	0,581	0,887	0,410	0,972	0,843	0,644	0,279
Ni-SU	0,521	0,022	0,410	0,484	0,359	0,076	0,833
Pb-SU	0,221	0,295	0,019	0,087	0,841	0,028	1,000
Se-SU	0,766	0,466	0,786	0,448	0,337	0,861	0,988
V-SU	0,133	0,482	0,948	0,234	0,463	0,521	0,168
Zn-SU	0,776	0,274	0,213	0,163	0,948	0,031	1,000
As-PL	1,000	0,903	0,639	0,879	0,476	0,337	0,988
Sb-PL	0,450	0,569	0,715	0,915	0,228	0,240	0,333
Cd-PL	0,121	0,295	0,050	0,397	0,194	0,385	0,529
Co-PL	0,948	0,365	1,000	0,794	0,521	0,521	0,833
Cr-PL	0,270	0,318	0,313	0,861	0,843	0,776	0,279
Cu-PL	0,678	0,540	0,552	0,496	0,031	0,708	0,436
Fe-PL	0,683	0,270	0,428	0,748	0,103	0,305	0,552
Hg-PL	0,726	0,024	0,226	0,603	0,147	0,147	0,667
Mn-PL	0,014	0,957	0,270	0,770	0,912	0,843	0,955
Ni-PL	0,652	0,000	0,239	0,490	0,524	0,281	0,645
Pb-PL	0,441	0,214	0,122	0,688	0,078	0,557	0,371
Se-PL	0,889	0,736	0,250	0,028	0,556	0,278	0,417
V-PL	0,810	0,234	0,385	0,726	0,002	0,313	0,355
Zn-PL	0,912	0,904	0,385	0,948	0,336	0,644	0,529
BIO-As	0,954	0,844	0,481	0,435	0,465	0,125	0,600
BIO-Sb	0,327	0,536	0,982	0,605	0,061	0,457	0,161
BIO-Cd	0,463	0,428	0,162	0,627	0,050	0,097	0,621
BIO-Co	0,463	0,171	0,552	0,972	0,521	0,230	0,833
BIO-Cr	0,050	0,318	0,581	0,754	0,463	0,644	0,279
BIO-Cu	0,313	0,428	0,003	0,052	0,552	0,001	0,833
BIO-Fe	0,359	0,834	0,744	0,889	0,230	0,359	0,621
BIO-Hg	0,726	0,024	0,226	0,603	0,147	0,147	0,667
BIO-Mn		0,887	0,133	0,889	0,810	0,912	0,279
BIO-Ni	0,059		0,242	0,377	0,401	0,224	0,594
BIO-Pb	0,533	0,435		0,071	0,463	0,025	0,955
BIO-Se	-0,059	-0,378	-0,683		0,726	0,083	0,250
BIO-V	-0,083	0,318	0,267	0,149		0,270	0,218
BIO-Zn	0,033	0,452	0,750	-0,663	0,400		0,729
Z	0,422	0,212	0,053	0,501	0,474	-0,158	