



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Biológicas

Escuela Profesional de Ciencias Biológicas

**Acumulación de metales pesados en *Senecio rufescens*
DC. en dos lagunas altoandinas de las regiones de Lima
y Junín, Perú**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Bióloga con mención en
Botánica

AUTOR

Abigail DEXTRE RUBINA

ASESOR

Enoc Efer JARA PEÑA

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Dextre, A. (2017). *Acumulación de metales pesados en Senecio rufescens DC. en dos lagunas altoandinas de las regiones de Lima y Junín, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Biológicas, Escuela Profesional de Ciencias Biológicas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

1384

861.
9(e)
89



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

ACTA DE SESIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE BIÓLOGA CON MENCIÓN EN BOTÁNICA (MODALIDAD: SUSTENTACIÓN DE TESIS)


Siendo las 11:04 horas del 14 de noviembre de 2017, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Biológicas y en presencia del jurado formado por los profesores que suscriben, se dio inicio a la sesión para optar al Título Profesional de Bióloga con mención en **Botánica** de **ABIGAIL DEXTRE RUBINA**.


Luego de dar lectura y conformidad al expediente N° 046-EPCB-2017, la titulando expuso su tesis: **“ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN *Senecio rufescens* DC. EN DOS LAGUNAS ALTOANDINAS DE LAS REGIONES DE LIMA Y JUNÍN, PERÚ”** y el Jurado efectuó las preguntas del caso calificando la exposición con la nota 18, calificativo: Aprobado con mención honorosa

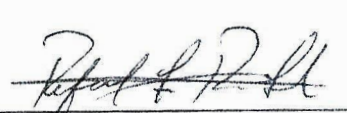
Finalmente, el expediente será enviado a la Escuela Profesional de Ciencias Biológicas y al Consejo de Facultad para que se apruebe otorgar el Título Profesional de Bióloga con mención en **Botánica** a **ABIGAIL DEXTRE RUBINA** y se eleve lo actuado al Rectorado para conferir el respectivo título, conforme a ley.

Siendo las 12:45 horas se levantó la sesión.

Ciudad Universitaria, 14 de noviembre de 2017.


Mg. JOSE ROQUE GAMARRA
(PRESIDENTE)


Mg. ENOC JARA PEÑA
(ASESOR)


Mg. RAFAEL LA ROSA LOLI
(MIEMBRO)


Blgo. CESAR ARANA BUSTAMANTE
(MIEMBRO)

A Nearias, Eladia, Angela, Iván,
Renato, Elio, Andy, Percy,
Cecilia y Lucero.

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento más profundo es para mi familia, el pilar de mis metas profesionales y mi razón de ser. A mis padres, a quienes admiro demasiado, por educarme con amor en un hogar sencillo y feliz. A mis hermanos porque siempre serán un ejemplo de superación para mí y porque a pesar de sus exigentes carreras están presentes cuando los necesito.

A mi asesor M. Sc. Enoc Jara le agradezco por acogerme durante tres años en el Laboratorio de Fitología Aplicada y brindarme las facilidades para el acceso en el uso de los equipos e infraestructura, sus consejos y su paciencia en mi largo proceso de investigación y escritura significaron mucho para mí. Al Mg. Tito Sánchez por su apoyo y confianza en mi trabajo, muchas gracias por darme la oportunidad de desarrollar mi tesis en el marco de un proyecto de colaboración entre grupos de diferentes disciplinas. A parte del equipo de investigación del proyecto: Diego Prada, Alan Salvatierra, Lee Arrieta y Karen Roa, quienes me ayudaron a completar el trabajo de campo en las condiciones climáticas más adversas.

A Valia Herrera por alentarme incondicionalmente durante el desarrollo de este trabajo, por contagiarme su pasión por la ciencia y sobre todo, por permitirme ser su amiga desde el primer año de la universidad. A Jhonatan Esplana, Stefany Quiñones y Estefanía Torrejón por las incontables horas de risas y alcohol en los momentos más difíciles. Me dieron el apoyo moral que me ayudó a terminar este trabajo sin perder la vida. A Walter Velásquez por darme fuerzas para seguir adelante en los meses de redacción, su OCD me ayudó a enfrentarme conmigo misma por primera vez en mi vida. A Carlos Martel quien además de su visión crítica sobre mi trabajo me ha permitido considerarlo un amigo desde que lo conocí.

Finalmente debo agradecer al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (PNICP)-Innovate Perú por el soporte financiero a través del proyecto "Monitoreo y evaluación de la calidad del agua en cabecera de cuenca del Rio Rímac, lagos y lagunas de la Región Central del Perú para determinar organismos indicadores y marcadores moleculares de contaminación por metales pesados" otorgado por el Fondo para la Innovación, Ciencia y Tecnología (FINCyT), Contrato N° 391-PNICP-PIAP-2014.

ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VI
INDICE DE FOTOGRAFÍAS	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1: INTRODUCCIÓN	1
2: MARCO TEÓRICO	3
2.1. Metales pesados en suelos	3
2.1.1. Arsénico	3
2.1.2. Cadmio	4
2.1.3. Cobre	5
2.1.4. Plomo	6
2.2. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo	6
2.2.1. pH	7
2.2.2. Conductividad eléctrica	8
2.2.3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	8
2.2.4. Materia orgánica	9
2.2.5. Textura de suelos	9
2.3. Acumulación de metales pesados en plantas	9
2.4. Categorías de la fitorremediación	10
2.4.1. Fitoextracción	11
2.4.2. Fitoestabilización	11
2.5. Índices de valoración de tolerancia de plantas a metales pesados	12
2.5.1. Factor de bioconcentración (FBC)	12
2.5.2. Factor de traslocación (FT)	13
3: HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	14
3.1. HIPÓTESIS	14
3.1.1. Hipótesis de investigación	14
3.2. OBJETIVOS	14
3.2.1. Objetivo General	14
3.2.2. Objetivos Específicos	14
4: MATERIALES Y MÉTODOS	15
4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
4.1.1. Laguna Ticticocha	15
4.1.2. Laguna Churuca	16

4.1.3. Aspecto físico	17
4.1.4. Aspecto biológico	19
4.2. MATERIALES	20
4.3. METODOLOGÍA	21
4.3.1. Selección de las estaciones de muestreo	21
4.3.2. Diseño de muestreo	24
4.3.3. Procesamiento de muestras en el laboratorio	25
4.3.4. Cálculo de los índices de valoración de tolerancia de <i>Senecio rufescens</i> a los metales pesados	27
4.3.5. Análisis estadístico	28
5: RESULTADOS	29
5.1. Principales propiedades físico-químicas del suelo	29
5.2. Metales pesados en los suelos rizosféricos	31
5.3. Acumulación de metales pesados en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i>	35
5.3.1. Arsénico	35
5.3.2. Cadmio	36
5.3.3. Cobre	38
5.3.4. Plomo	39
5.4. Índices de valoración de tolerancia de <i>S. rufescens</i> a los metales pesados	40
5.4.1. Factor de bioconcentración (FBC)	40
5.4.2. Factor de traslocación (FT)	42
6: DISCUSIÓN	44
6.1. Propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos	44
6.2. Metales pesados en los suelos rizosféricos	45
6.2.1. Arsénico	47
6.2.2. Cadmio	48
6.2.3. Cobre	48
6.2.4. Plomo	49
6.3. Acumulación de metales pesados en plantas de <i>Senecio rufescens</i>	50
6.3.1. Arsénico	51
6.3.2. Cadmio	53
6.3.3. Cobre	54
6.3.4. Plomo	55
6.4. Índices de valoración de tolerancia de <i>S. rufescens</i> a los metales pesados	57
7: CONCLUSIONES	60
8: RECOMENDACIONES	62
9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
10: ANEXOS	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Localización del área de estudio.	15
Figura 2 Esquema geológico del área de estudio y ubicación de los puntos evaluados	17
Figura 3 Plano hidrogeológico del área de estudio y ubicación de los puntos evaluados	18
Figura 4 Propiedades químicas de los suelos rizosféricos de los alrededores de las dos lagunas evaluadas.	29
Figura 5 Concentración de metales pesados totales en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.	32
Figura 6 Concentración de cadmio en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.	33
Figura 7 Concentración de metales pesados ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca.	35
Figura 8 Concentración total de arsénico en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.	36
Figura 9 Concentración total de cadmio en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.	37
Figura 10 Concentración total de cobre en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.	39
Figura 11 Valores promedio de las concentraciones de plomo en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.	40
Figura 12 Factores de bioconcentración en los tejidos aéreos de <i>S. rufescens</i> de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca.	41
Figura 13 Factores de traslocación de los metales pesados analizados en los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca.	42

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de muestreo alrededor de la laguna Ticticocha.	23
Tabla 2 Ubicación de las estaciones de muestreo alrededor de la laguna Churuca.	24
Tabla 3 Análisis de las propiedades químicas de los suelos rizosféricos en los tres puntos de muestreo en los alrededores de la laguna Ticticocha.	30
Tabla 4 Análisis de las propiedades químicas de los suelos rizosféricos en los tres puntos de muestreo en los alrededores de la laguna Churuca.	30
Tabla 5 Fracciones minerales (arena, limo y arcilla) promedio de los suelos rizosféricos en los alrededores de las lagunas evaluadas.	31
Tabla 6 Concentración de metales pesados ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha.	31
Tabla 7 Concentración de metales pesados ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Churuca.	32
Tabla 8 Concentración promedio de metales pesados en suelos de los alrededores de la laguna Ticticocha y valores comparativos de acuerdo a la legislación nacional e internacional.	34
Tabla 9 Concentración de arsénico ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.	36
Tabla 10 Concentración de cadmio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.	37
Tabla 11 Concentración de cobre ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.	38
Tabla 12 Concentración de plomo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.	39
Tabla 13 Factores de bioconcentración en los tejidos aéreos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de la laguna Ticticocha.	41
Tabla 14 Factores de bioconcentración en los tejidos aéreos de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de la laguna Churuca	42
Tabla 15 Factores de traslocación de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de la laguna Ticticocha	43
Tabla 16 Factores de traslocación de <i>Senecio rufescens</i> de los alrededores de la laguna Churuca	43

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Porte de <i>Senecio rufescens</i> DC en la laguna Ticticocha, Lima	21
Fotografía 2 Vista panorámica de la laguna Ticticocha, Lima	22
Fotografía 3 Vista panorámica de la laguna Churuca, Junín	23

RESUMEN

La habilidad de algunas plantas nativas para tolerar concentraciones extremas de metales pesados en los suelos indicaría su potencial para ser empleadas en la remediación de sitios contaminados por metales. El objetivo de este estudio fue determinar la concentración de arsénico, cadmio, cobre y plomo en la parte aérea (tallos + hojas) y las raíces de *Senecio rufescens*, establecer qué parte de la planta acumula más que la otra y relacionarlo con los contenidos respectivos de metales en los suelos. Se evaluó la posibilidad de emplear esta especie para propósitos de remediación mediante el cálculo del factor de bioconcentración (FBC) y de traslocación (FT). Los ejemplares de *S. rufescens* se colectaron en dos localidades altoandinas: laguna Churuca (de suelos contaminados por minería) y laguna Ticticocha (de suelos aparentemente sin contaminación). Se analizó el contenido de metales totales de las plantas y sus suelos asociados mediante ICP-AES (espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplado inductivamente). Los resultados indican que la concentración de cobre y arsénico en la parte aérea de las plantas de *S. rufescens* de Churuca es significativamente superior al de la población de Ticticocha ($p \leq 0.05$), a pesar de que los contenidos de metales pesados en los suelos de ambas localidades no son significativamente diferentes ($p > 0.05$), mientras que las cantidades de cadmio y plomo registradas en la parte aérea y la raíz de *S. rufescens* no muestran diferencias entre ambas localidades ($p > 0.05$). El análisis de los FBC y los FT reveló que *S. rufescens* acumula eficientemente arsénico y plomo en sus raíces pero la acumulación de los demás metales en la parte aérea es limitada. Por lo tanto se propone a *S. rufescens* como una especie exclusora de arsénico y plomo, potencialmente útil para estudios de fitoestabilización de suelos contaminados en la zona de estudio. El presente estudio registra por primera vez la evaluación de *Senecio rufescens* como un especie nativa promisoría para tecnologías de fitorremediación.

Palabras clave: suelos contaminados, metales pesados, traslocación, acumulación, fitoestabilización

ABSTRACT

The ability of some native plants to tolerate extreme conditions, where the metal concentration is very high in soil would indicate their potential use in environmental technologies for restoration of heavy metal contaminated sites. The aim of this study was to determine arsenic, cadmium, copper and lead concentration in roots and shoots of *Senecio rufescens*, a native species, in order to determine which part of the plants accumulate trace elements to the greatest extent and compare the metal concentrations in soil. Bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) were determined to evaluate their potential for phytoremediation purposes. *Senecio rufescens* plants were sampled in surroundings of the high Andean Churuca Lake (soils affected by mining) and Ticticocha Lake (soil without contamination apparent). The total metal content of the plants and their associated soils was analyzed by ICP-AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy). The results indicated that the accumulation of arsenic and copper in the aerial parts of the Churuca's population was significantly higher than that of the Ticticocha's ($p \leq 0.05$), however the heavy metal concentration in soils of both localities was not significantly different ($p > 0.05$). On the other hand, the amount of cadmium and lead accumulated in the aerial and roots of *S. rufescens* did not show differences between plants of both localities ($p > 0.05$). Furthermore, the analysis of bioaccumulation and translocation factors revealed that this species is a poor accumulator in aerial parts of the selected heavy metals. Nevertheless, *S. rufescens* acts like an excluder of arsenic and lead because it accumulates those metals efficiently in their roots ($TF < 1$). This suggests that this species has the potential for phytostabilization of sites contaminated by arsenic and lead. The present study records for the first time the assessment of *Senecio rufescens* as a promising native species with the potential to be used in the phytoremediation of soils in Andean areas that are impacted by mining.

Keywords: contaminated soil, heavy metal, translocation, accumulation, phytostabilization

1: INTRODUCCIÓN

El Perú ocupa lugares muy importantes en Latinoamérica y el mundo por su producción y potencial minero.(Dammert y Molinelli, 2007), sin embargo las prácticas no-sostenibles ligadas a esta actividad se deben, entre otras cosas a métodos inadecuados en la disposición y contención de relaves que han provocado el deterioro de las fuentes hídricas (ríos, lagos y/o lagunas), siendo tradicionalmente los recursos naturales más afectados por la contaminación de las actividades mineras (World Bank, 2006; Núñez y Castañeda, 1999)

La remediación de estos ecosistemas contaminados y peligrosos debe constituir un tema ambiental prioritario para el país. Entre las diferentes técnicas de tratamiento de lugares contaminados con elementos tóxicos, están las técnicas de fitorremediación que han surgido como una alternativa más eficiente, barata y sustentable que las tecnologías convencionales de remediación (Salt et al., 1998) y están orientadas a la recuperación de la calidad de las fuentes hídricas y de los suelos asociados a estas.

El éxito de la fitorremediación depende de la capacidad de las especies vegetales idealmente nativas de la región de interés para tolerar y acumular altas concentraciones de metales pesados del suelo (Baker y Whiting, 2002), por lo que es necesario evaluar las plantas y encontrar nuevos acumuladores adecuados para la aplicación de esta técnica, pues es urgente el desarrollo de esta técnica para hacer frente a los numerosos problemas de contaminación a nivel nacional.

Senecio rufescens fue seleccionada en este estudio debido a que es una especie de amplia distribución en el Perú (Beltrán et al., 2013) que ha sido reportada alrededor de lagunas visiblemente no impactadas, así como también cerca de lagunas altamente contaminadas por actividades mineras (información no publicada), este comportamiento indicaría que esta especie presenta un carácter prometedor para los propósitos de remediación. Por lo que se determinó la concentración de arsénico, cadmio, cobre y

plomo en los tejidos de *Senecio rufescens* que crecen alrededor de dos lagunas altoandinas de la región Lima: Ticticocha y Churuca, así como de sus suelos rizosféricos asociados. Asimismo se determinaron algunas propiedades físicas y químicas de los suelos rizosféricos (textura, pH, materia orgánica y conductividad eléctrica) pues afectan la movilidad de los metales pesados en el suelo (Violante et al., 2010) y son muy importantes en el análisis de su disponibilidad para ser absorbidas por las plantas (Intawongse y Dean, 2006).

El contenido de metales en las muestras vegetales y en las muestras de suelo fueron fundamentales para el cálculo y el análisis del factor de bioconcentración (relación entre la concentración del metal pesado en la parte aérea de la planta y la concentración del mismo elemento en el suelo) y del factor de traslocación (relación entre la concentración del metal pesado en la parte aérea y la concentración del mismo elemento en sus raíces), índices útiles para conocer la eficiencia de las especies vegetales para acumular metales pesados en sus tejidos y evaluar su uso potencial en técnicas de fitorremediación (Zayed et al., 1998).

2: MARCO TEÓRICO

2.1. Metales pesados en suelos

Los metales pesados se caracterizan por tener una alta densidad relativa y alto peso atómico relativo con un número atómico mayor que 20. Algunos metales pesados como Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, V y Zn son necesarios en cantidades diminutas por los organismos. Sin embargo, en cantidades excesivas pueden llegar a ser dañinas para estos. Otros metales pesados como el Pb, el Cd, el Hg y el As (un metaloide, pero generalmente denominado metal pesado) no tienen ningún efecto beneficioso sobre los organismos y por lo tanto son considerados como las "principales amenazas", ya que son muy perjudiciales para plantas y animales (Chibuike y Obiora, 2014).

Estos elementos se encuentran en estado natural formando parte de los minerales del suelo, sin embargo diversas actividades antropogénicas, como la extracción y procesamiento de metales en las actividades mineras generan gran cantidad de desechos que se depositan sobre la superficie del suelo y cuando no se toman las prevenciones adecuadas pueden transportar contaminantes hacia las fuentes hídricas aledañas a las operaciones (Herrera y Millones, 2011; Martínez, García y Pérez, 2012). Esta investigación se enfoca en cuatro metales pesados: arsénico, cadmio, cobre y plomo, los cuales representan elementos esenciales y no esenciales de mayor incidencia en los suelos del área de estudio. A continuación algunos de sus características más relevantes con respecto a su ocurrencia en el suelo, usos y toxicidad.

2.1.1. Arsénico

El arsénico se encuentra raramente como su forma nativa debido a su afinidad con otros elementos. En el medio ambiente, el arsénico existe en cuatro estados de oxidación: arsenato (As^{+5}), arsenito (As^{+3}), arsénico elemental (As) y arsina (As^{-3}) (Rahman y Hasegawa, 2011). En general, la contaminación por arsénico se ha producido como resultado de las actividades mineras, el uso de herbicidas arsenicales, insecticidas y

conservantes de madera y el riego con aguas subterráneas contaminadas (Zhao et al., 2009). La fitotoxicidad del arsénico viene determinada por la forma química presente en los suelos, siendo el arsenito más fitotóxico que el arseniato (Kabata-Pendias y B. Mukherjee 2007), varían principalmente dependiendo de la fuente de arsénico y de la textura del suelo, estableciendo límites de toxicidad para suelos francos y arenosos (40 mg•kg⁻¹ de As total) y suelos arcillosos (200 mg•kg⁻¹) (Alloway, 2013), mientras que el rango de concentración en suelos no contaminados están típicamente por debajo de 10 mg•kg⁻¹ (Fitz y Wenzel, 2002).

El rango de acumulación de arsénico en plantas oscila entre 0,009 y 1,5 mg•kg⁻¹ para la mayoría de las plantas que crecen en suelos no contaminados, concentraciones mayores son principalmente específicos de especies, cultivares y/o ecotipos (Alloway, 2013). El consumo de agua subterránea contaminada es quizás la vía de exposición más común de los seres humanos a la toxicidad de este elemento (Fitz y Wenzel, 2002).

2.1.2. Cadmio

El cadmio es considerado uno de los metales más tóxicos, por provocar efectos adversos en todos los procesos biológicos de seres humanos, animales y plantas, además la mayor parte de la contaminación por cadmio de diversas fuentes permanece en la capa superior de 15 cm de profundidad de suelo, aumentando la posibilidad de ingresar a la cadena alimenticia (Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007). La concentración natural de cadmio en el suelo es muy baja, para suelos no contaminados su contenido se rige por la textura de los suelos y su promedio es de 0,22 a 0,51 mg kg⁻¹ en suelos ligeramente arenosos y arcillosos, respectivamente (Kabata-Pendias, 2011). La mayor parte del Cd se produce como subproducto de la fundición de Zn, encontrado con Zn en el ambiente (Alloway, 2013).

Es bien sabido que el cadmio puede inducir deficiencia de nutrientes esenciales e incluso disminuir las concentraciones de muchos macronutrientes en las plantas (F. de Almeida et al., 2007). A pesar de que las plantas no tienen ningún requisito metabólico

para cadmio, se encuentran relativamente disponibles para su absorción por las mismas, sin embargo existen estudios que indican que esta disponibilidad depende más de los parámetros del suelo que de la especie vegetal (Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007), estando ligados a la arcilla y suelos básicos, pero siendo más móvil en suelos arenosos y ácidos (Intawongse y Dean, 2006). Además, es uno de los elementos más tóxicos para los humanos, su exceso principalmente provoca daño en los huesos, en el hígado y el riñón, hipertensión, etc. Puede ser expuesto a los seres humanos por inhalación e ingestión de alimentos y bebidas (Intawongse y Dean, 2006; Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007).

2.1.3. Cobre

El cobre se produce naturalmente en el medio ambiente en una amplia gama de depósitos minerales, por lo que su distribución espacial en los suelos está relacionada principalmente a la geología regional y local (Alloway, 2013), según su composición química se encuentra en sus formas sulfuradas u oxidadas (Herrera y Millones, 2012). El contenido medio total de cobre en suelos de diferentes grupos en todo el mundo oscila entre 14 y 109 mg·kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2011).

El Perú ocupa el segundo lugar en Latinoamérica en producción de cobre y el tercer lugar a nivel mundial (Dammert y Molinelli, 2007). En general la mayoría del cobre se utiliza para electricidad (50%), maquinaria no eléctrica (20%) y construcción (16%) (Dammert y Molinelli, 2007), exponiéndose a los seres humanos a través de alimentos y agua potable. A pesar de que este elemento es requerido a niveles traza con el fin de ayudar a la formación de hemoglobina y metabolismo de carbohidratos, la deficiencia y la toxicidad del cobre se observa raramente en seres humanos (Intawongse y Dean, 2006). Una ingesta de 10 mg/día es considerado como la máxima tolerable para adultos, basado en la protección del daño hepático como un efecto adverso crítico (Georgopoulos et al., 2005). En las plantas, el Cu es un micro-elemento esencial

involucrado en varios procesos metabólicos, como la producción de semillas, la resistencia a enfermedades y la regulación del agua (Lepp, 1981).

2.1.4. Plomo

La forma primaria de Pb en el estado natural es el mineral de sulfuro insoluble, galena, PbS, aunque también se puede encontrar en otros compuestos como PbCO₃ y PbSO₄ (Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007). La producción de plomo en el Perú ocupa el primer lugar en Latinoamérica y el cuarto lugar en el mundo (Dammert y Molinelli, 2007).

Puesto que no es un elemento esencial para las plantas, el plomo presenta baja disponibilidad para ser absorbida por estas, principalmente debido a la gran afinidad que tiene este metal por asociarse con la materia orgánica del suelo (Peris Mendoza, 2006). En general, los niveles naturales de este metal en las plantas son muy bajos y no suelen presentar problemas de toxicidad por plomo si se encuentran dentro del rango de 2 a 6 mg•kg⁻¹ en sus tejidos (Kabata-Pendias 2011), sin embargo el exceso puede disminuir la germinación de semillas, provocar crecimiento raquítrico, clorosis, ennegrecimiento del sistema radicular, entre otros (F. de Almeida et al., 2007).

Por otro lado, la ruta más importante de exposición a seres humanos es mediante la ingestión de alimentos contaminados con plomo y en un menor porcentaje por inhalación. Los efectos de toxicidad en humanos incluyen hipertensión y daño cerebral (Intawongse y Dean, 2006; Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007). Mientras que la concentración recomendada de plomo para la protección de la salud ambiental y humana en suelos de uso industrial es 600 mg•kg⁻¹ (CCME 1999), el estándar de calidad ambiental para suelos del mismo uso en Perú es de 1200 mg•kg⁻¹ (DS-002-2013-MINAM, 2013).

2.2. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo

La mayoría de las legislaciones ambientales que se emplean para establecer límites reglamentarios para usos específicos del suelo (agrícola, recreativo, urbano, industrial,

etc.) se basan en las concentraciones totales de contaminantes (Gómez-Sagasti et al., 2016). Sin embargo, los valores de concentración total no necesariamente indican que se encuentran presentes en formas disponibles para las plantas, microorganismos o procesos de lixiviación (Hooda, 2010), por tanto para evaluar mejor el impacto de los contaminantes del suelo sobre los organismos se debe tener en cuenta la movilidad y la biodisponibilidad de metales pesados en el suelo (Azevedo Silveira et al., 2003).

El término biodisponibilidad se refiere a la fracción contaminante que está disponible para ser absorbida o transformada por un organismo vivo (Semple et al., 2003). La biodisponibilidad depende de una serie de factores. Generalmente, las condiciones que dan lugar a una menor retención de metal en el suelo (por ejemplo, bajo pH, bajo contenido de materia orgánica) conducen a una mayor biodisponibilidad para los organismos vivos. Las propiedades del suelo que influyen en la biodisponibilidad de los metales incluyen pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio de catión, condiciones redox, presencia de hidróxidos hidratados y otros iones (Intawongse y Dean, 2006). Los parámetros seleccionados en este estudio y que afectan la biodisponibilidad de los metales para la absorción de las plantas se discuten a continuación:

2.2.1. pH

El pH es la medida de acidez y alcalinidad de la solución del suelo, probablemente es el factor más importante que rige no solo la solubilidad de los químicos (incluyendo metales tóxicos y nutrientes), sino también la especiación de metales y por tanto su eventual biodisponibilidad para las plantas (Freitas, Prasad y Pratas, 2004). La solubilidad de los metales traza tiende a aumentar a pH más bajo, con la excepción de Mo, Se y As debido a la precipitación como hidróxidos insolubles, carbonatos y complejos orgánicos (Intawongse y Dean, 2006).

Es comúnmente reconocido que a pH=6.5 la biodisponibilidad de nutrientes para las plantas es máxima y la toxicidad es mínima (Wong, 2003), mientras que el rango de pH

que se debe mantener en suelos industriales para la protección de la salud ambiental y humana es de 6-8 (CCME, 1999).

2.2.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica, generalmente se expresa en dSiemens/m. La determinación de la conductividad eléctrica es una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo (Fernández et al., 2006). Los suelos con elevada conductividad eléctrica impiden el buen desarrollo de las plantas, ya que contienen una elevada cantidad de sales (Garrido, 1994). En la evaluación de la toxicidad de suelos con fuerte absorción de metales pesados, los efectos de salinidad podrían contribuir significativamente a la disponibilidad de metales y su toxicidad (Stevens et al., 2003).

2.2.3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La mayoría de los metales pesados (con ciertas excepciones, incluyendo los metaloides As, Sb y Se y los metales Mo y V) existen principalmente como cationes en la solución del suelo, para mantener la electroneutralidad la carga negativa superficial se equilibra con una cantidad igual de cationes de la solución del suelo, propiedad conocida como capacidad de intercambio catiónico (Intawongse y Dean, 2006). La CIC está directamente relacionada a la capacidad de los suelos de absorber metales pesados, mientras más alto el valor de la CIC mayor disponibilidad en los sitios de intercambio de los minerales del suelo para la retención de metales (Azevedo, Ferracciú y Guimarães, 2003). Los suelos con alto contenido de arcilla o materia orgánica tienden a tener una CIC alta, mientras que los suelos arenosos tienen una CIC relativamente baja (Intawongse y Dean, 2006).

En el presente estudio, la CIC se reportó como “Capacidad de Intercambio Catiónico Estimado” porque esta propiedad fue calculada (en vez de ser determinada analíticamente) por medio de la suma de las cargas de los cationes básicos (Ca, Mg, Na and K) y estimaciones de cargas de los cationes ácidos derivadas del pH del suelo.

2.2.4. Materia orgánica

La materia orgánica es el material orgánico no vivo en el suelo, que constituye la mayor parte de los componentes orgánicos totales. En términos generales mejora la retención de agua y contribuye al aumento de los sitios de adsorción, reforzando la fase sólida del suelo. (Alloway 2013). La materia orgánica es el componente más importante del suelo que retiene los metales pesados pues influye significativamente en aumentar la biodisponibilidad de los mismos (IHOBE 2010).

La CIC de la materia orgánica del suelo oscila en el rango de 100 a 300 Cmol(+)/Kg⁻¹ dependiendo de su naturaleza y composición (Hooda, 2010), por lo que es una rica fuente de cargas negativas y puede contribuir significativamente al CIC del suelo (Intawongse y Dean, 2006).

2.2.5. Textura de suelos

La textura del suelo es un factor importante en la retención o liberación de elementos traza. En general, los suelos de textura gruesa presentan una menor tendencia a la absorción de oligoelementos que los suelos de grano fino. Estos últimos contienen partículas con grandes áreas superficiales de alta reactividad como minerales arcillosos, oxihidróxidos de hierro y manganeso, ácidos húmicos y otros (Hooda, 2010). Por lo tanto al incrementar los minerales de arcilla y los óxidos hidratados en los suelos, se proporcionan más sitios para la adsorción de metales, reduciendo directamente la biodisponibilidad del mismo (Reichman, 2002)

2.3. Acumulación de metales pesados en plantas

Algunas especies que crecen naturalmente en suelos con alto contenido de metales (suelos metalíferos) han desarrollado la habilidad de acumular grandes cantidades de metales en sus tejidos que normalmente serían fitotóxicas para otras plantas (Baker y Brooks, 1989). Esta capacidad de las plantas para captar metales pesados del medio ha sido usada para degradar y/o remover contaminantes del suelo, sedimentos y aguas

poco profundas mediante una técnica sustentable denominada fitorremediación (Vangronsveld et al., 2009). En estas últimas dos décadas, muchas plantas terrestres han sido evaluadas para propósitos de fitorremediación (Adhikari et al., 2010). Las plantas acumuladoras son a menudo algunas de las pocas especies capaces de colonizar el suelo contaminado con altas concentraciones de metales pesados y, al hacerlo, pueden delinear la extensión de la contaminación (Cheng, 2003), por lo que en estudios recientes, hay un interés permanente en la selección de plantas nativas tolerantes a elevada cantidad de contaminantes en el suelo y la evaluación de su potencial de fitorremediación en condiciones de campo (Borghei et al., 2014).

Algunos investigadores han realizado estudios en el Perú para encontrar especies vegetales que puedan acumular metales tóxicos en los tejidos de la raíz y la parte aérea, con la finalidad de emplearlas en técnicas de remediación de lugares contaminados (Aliaga et al., 2009; Argota et al., 2014; Bech et al., 1997; Bech, Durán et al., 2012a; Bech et al., 2012b; Bobadilla et al., 2013; Durán, 2010; García, 2012; Hidalgo et al., 2010; Iannacone y Alvarino, 2005; Jara Peña et al., 2014; Medina y Montano, 2014; Padilla et al., 2009; Tapia, 2007).

2.4. Categorías de la fitorremediación

Dependiendo de los contaminantes, de las condiciones del sitio, del nivel de remediación requerido y de los tipos de plantas, la tecnología de fitorremediación puede utilizarse para la contención (fitoimmobilización y fitostabilización) o eliminación (fitoextracción y fitovolatilización) (Thangavel y Subhram, 2004) Las cuatro tecnologías vegetales de fitorremediación tienen un mecanismo de acción diferente para remediar el suelo, los sedimentos o el agua contaminados con metales (Padmavathiamma y Li, 2007). Básicamente, dos tipos de fitorremediación son aplicables a los suelos contaminados por metales pesados: la fitoextracción y la fitoestabilización.

2.4.1. Fitoextracción

La fitoextracción se basa en el uso de plantas para la acumulación de elementos traza y la extracción de sustancias orgánicas del suelo, concentrándolas en las partes cosechables (Salt et al., 1998), debido a que la cosecha de la biomasa radical generalmente no es factible. Una planta ideal para la fitoextracción debe poseer las siguientes características: crecimiento rápido, acumulación de elementos traza en la parte aérea, de fácil cosecha, acumulación efectiva de elementos traza en su biomasa y tolerancia a los contaminantes acumulados (Vangronsveld et al., 2009).

El descubrimiento de plantas hiperacumuladoras capaces de absorber metales pesados en un contenido 50-500 veces mayores que las plantas normales ha llevado al avance revolucionario de la tecnología de fitoextracción (Baker y Brooks, 1989). Se consideran hiperacumuladoras a plantas superiores capaces de acumular >1mg de Au y Ag; >100 mg de Cd, Se y Ta; >1000 mg de Cu, Co, Cr, Ni, Pb, U y As; Y >10.000 mg Mn y Zn por 1 kg de peso seca de los tallos en suelos ricos en metales pesados y metaloides (van der Ent et al., 2013). Sin embargo, la resistencia a metales por sí sola no es suficiente para permitir que las plantas acumulen altas concentraciones de metales. La biodisponibilidad de los metales en el suelo, la absorción en las raíces y la translocación son también esenciales para el éxito de la fitoextracción (Salt et al., 1998).

2.4.2. Fitoestabilización

Algunos suelos están tan contaminados que el uso de plantas para eliminar metales tomaría gran cantidad de tiempo y la fitoextracción no sería posible o deseable (Marques et al., 2009; McGrath y Zhao, 2003). Una alternativa que limita el riesgo ambiental de estos suelos contaminados es la fitoestabilización, que considera el uso de plantas para reducir la biodisponibilidad de contaminantes en el ambiente, inmovilizando los metales en el suelo (Salt et al., 1998). Las especies vegetales que no absorben altas concentraciones de metales proporcionan una buena herramienta para lograr la estabilización superficial de suelos contaminados con metales pesados, pues

disminuyen la probabilidad de que ingresen a la cadena alimenticia (Conesa y Arnaldos, 2006). Las características de las plantas apropiadas para la fitostabilización en un sitio particular incluyen: tolerancia a altos niveles del contaminante de interés; alta producción de biomasa radicular capaz de inmovilizar estos contaminantes por absorción, precipitación o reducción y, finalmente la retención de contaminantes en las raíces (en contraposición a la transferencia a las partes aéreas de la fitoextracción), para evitar la eliminación mediante manipulación o eliminación de los vástagos (Padmavathiamma y Li, 2007).

2.5. Índices de valoración de tolerancia de plantas a metales pesados

La tolerancia a los metales puede originarse a partir de dos estrategias básicas: la exclusión y la acumulación de metales (Baker, 1981). La estrategia de exclusión comprende la restricción del transporte de metal a los tallos y hojas para evitar la acumulación de metal (Wang, Cui y Dong, 2002), mientras que la estrategia de acumulación consiste en desarrollar mecanismos especializados para mantener los metales en los tallos y hojas (Baker, 1981).

Para conocer la capacidad de exclusión/acumulación de metales por las plantas se emplea el factor de bioconcentración (FBC) y de translocación (FT) y esta habilidad pueden tener aplicaciones comerciales dentro de las técnicas de la fitorremediación, ya sea para la revegetación de suelos contaminados (fitoestabilización) o para su rehabilitación (fitoextracción). Estos índices se calculan de la siguiente manera:

2.5.1. Factor de bioconcentración (FBC)

Indica la eficiencia de una planta en absorber metales pesados del sustrato y acumularlos en sus tejidos subterráneos o aéreos (Zayed et al., 1998). Se calcula como sigue:

$$FBC = \frac{C_{\text{parte aérea o raíz}}}{C_{\text{suelo}}}$$

Donde $C_{\text{parte aérea o raíz}}$ es la concentración del metal en el tejido de la parte aérea o de la raíz de la planta y C_{suelo} es la concentración del metal respectivo en el suelo.

En las especies exclusoras, el FBC aéreo es típicamente < 1, mientras que en las especies acumuladoras de metales generalmente es >1 (Yoon et al., 2006).

2.5.2. Factor de traslocación (FT)

Indica la eficiencia de la planta en la traslocación de los metales pesados acumulados de las raíces a la parte aérea (Padmavathiamma y Li, 2007; Adesodun et al., 2009). Se calcula de la siguiente manera

$$FT = \frac{C_{\text{parte aérea}}}{C_{\text{raíz}}}$$

Donde $C_{\text{parte aérea}}$ es la concentración del metal objetivo (As, Cd, Cu, Pb) en el tejido de la parte aérea de la planta y $C_{\text{raíz}}$ es la concentración del metal respectivo en la raíz.

Las plantas acumuladoras de metales se caracterizan por su factor de traslocación mayor que uno TF >1 (Tangahu et al., 2013)

Para evaluar el carácter acumulador de una planta, con respecto a un metal determinado tienen que considerarse ambos factores (FBC y FT), pues las plantas con FBC aéreo y FT mayor que uno tienen el potencial de ser utilizados en la fitoextracción (Fitz y Wenzel, 2002). Mientras que las plantas con el FT < 1 tienen el potencial para la fitoestabilización (Yoon et al., 2006).

Además las plantas hiperacumuladoras deben tener no solo FBC > 1 o TF > 1, si no también elevadas concentraciones de los metales en sus tejidos, cuyos valores umbrales varían dependiendo de uno u otro metal pesado, en función de su fitotoxicidad específica (Rascio y Navari, 2011).

Puesto que los metales de interés del presente estudio son arsénico, cadmio, cobre y plomo, *Senecio rufescens* podría ser considerada hiperacumuladora de alguno de estos metales si además de tener FBC>1 o TF>1, también concentra 100 de Cd, 300 de Cu, 1000 de As o 1000 Pb en sus tejidos aéreos sin sufrir daños fitotóxicos (todas en unidades mg•kg⁻¹, mg de metal por kg de peso seco de la planta) (van der Ent et al., 2013).

3: HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. HIPÓTESIS

3.1.1. Hipótesis de investigación

- Los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Churuca presentan mayor concentración de metales pesados en comparación con los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Ticticocha.

3.2. OBJETIVOS

3.2.1. Objetivo General

- Evaluar la concentración de metales pesados (arsénico, cadmio, cobre y plomo) en los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca, en relación con el contenido de estos metales en sus respectivos suelos rizosféricos.

3.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físico-químicas (textura, pH, materia orgánica y conductividad eléctrica) de los suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.
- Determinar el contenido de arsénico, cadmio, cobre y plomo de los suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca y verificar sus respectivos niveles de contaminación.
- Determinar la concentración de arsénico, cadmio, cobre y plomo en la parte aérea (tallos y hojas) y en las raíces de *Senecio rufescens*.
- Calcular el factor de bioconcentración y de traslocación de arsénico, cadmio, cobre y plomo de *Senecio rufescens* DC de las lagunas Ticticocha y Churuca.

4: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la laguna Ticticocha ubicada políticamente en el distrito de Chicla de la provincia de Huarochirí, región Lima, en los límites con la región Junín y la laguna Churuca ubicada políticamente en el distrito de Morococha de la provincia de Yauli, región Junín (**Figura 1**). Las lagunas están distantes entre sí aproximadamente 8.5 km y ubicadas a 4.700 y 4.642 msnm, respectivamente. Se puede acceder a ambas lugares desde la ciudad de Lima por la Carretera Central siguiendo la ruta Lima – Chosica – Casapalca – Ticlio, hasta el paraje llamado Morococha (142 km).

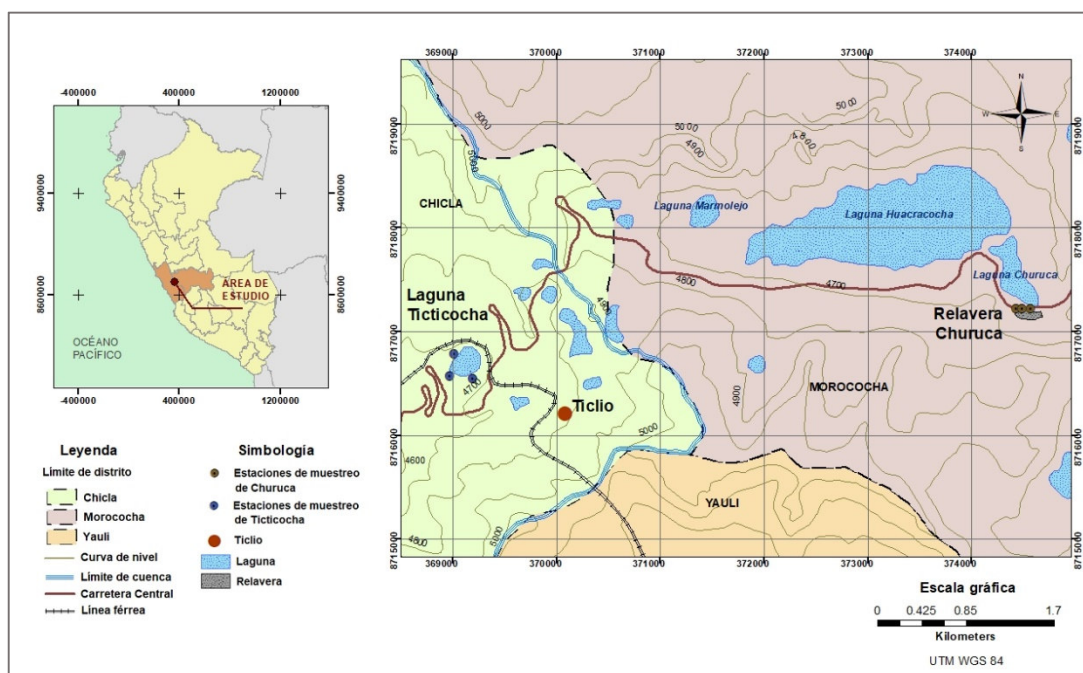


Figura 1 Localización del área de estudio.

4.1.1. Laguna Ticticocha

De acuerdo al Sistema de Información Geológico Catastral Minero (GEOCATMIN, 2016), la laguna Ticticocha forma parte del área de concesión minera “Acumulación Ticlio” (Código: 010000614L) de propiedad de Volcan Compañía Minera S.A.A.. No fue posible determinar si la laguna Ticticocha se emplea para el abastecimiento de aguas con fines domésticos o industriales ligadas a las actividades de esta empresa, pues no

se encontró información sobre las autorizaciones otorgadas por el Administrador Técnico de Distrito de Riego (ATDR). Además, no se observó un cauce de salida superficial visible, lo que indicaría que sus aguas solo drenarían de manera sub-superficial.

Se consideró a esta laguna no disturbada por actividad minera, puesto que no se observó ningún tipo de afectación de las aguas (mediante sistemas de tuberías de descarga, por ejemplo), ni tampoco alteración del perfil natural del suelo, dado que no se observó exposición de suelo desnudo o desprovisto de vegetación alrededor de esta laguna, excepto por un extremo relativamente cerca de la carretera en la que se advirtió un área de desmonte de suelo removido probablemente por algún tipo de deslizamiento.

4.1.2. Laguna Churuca

La zona de muestreo empleada en este estudio comprendió al cuerpo de agua ubicado unos metros al frente de la laguna Churuca, cruzando la carretera (Figura 1). Puesto que las aguas de esta laguna probablemente drenen de manera sub-superficial hacia el cuerpo de agua seleccionado como zona de muestreo se le asignó el nombre de Laguna Churuca, por razones prácticas y de mejor identificación. La laguna Churuca pertenece al área de la concesión minera “Toromocho Uno” (Código: 0804354PY01) cuyo titular es la Minera Chinalco Perú SA (GEOCATMIN, 2016). De acuerdo a la revisión de la carta nacional oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN), actualizada al 2011 y empleada como referencia oficial base para los derechos mineros (GEOCATMIN, 2016), esta zona fue una laguna hace algunos años, pero en la actualidad prácticamente está desapareciendo puesto que el espejo de agua es muy bajo e incluso nulo en algunas zonas.

A lo largo del borde de la laguna y paralelo a la carretera se observaron sistemas de entubamiento y tubos de descarga en el extremo oeste. Es probable que cuenten con autorizaciones para vertimientos otorgadas por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), sin embargo no fue posible acceder a estos permisos. Tampoco se pudo

determinar las sustancias que fueron vertidas en este cuerpo de agua, por lo que se desconoce la fuente exacta de la evidente contaminación.

4.1.3. Aspecto físico

En este apartado se describen las principales características del medio físico natural relacionados con los objetivos de este estudio: la geología e hidrogeología puesto que condicionan la ocurrencia de aguas subterráneas, en su mayoría asociadas a las formaciones de rocas consolidadas, principalmente en las rocas ígneas intrusivas (intrusivos Morococha y Anticona).

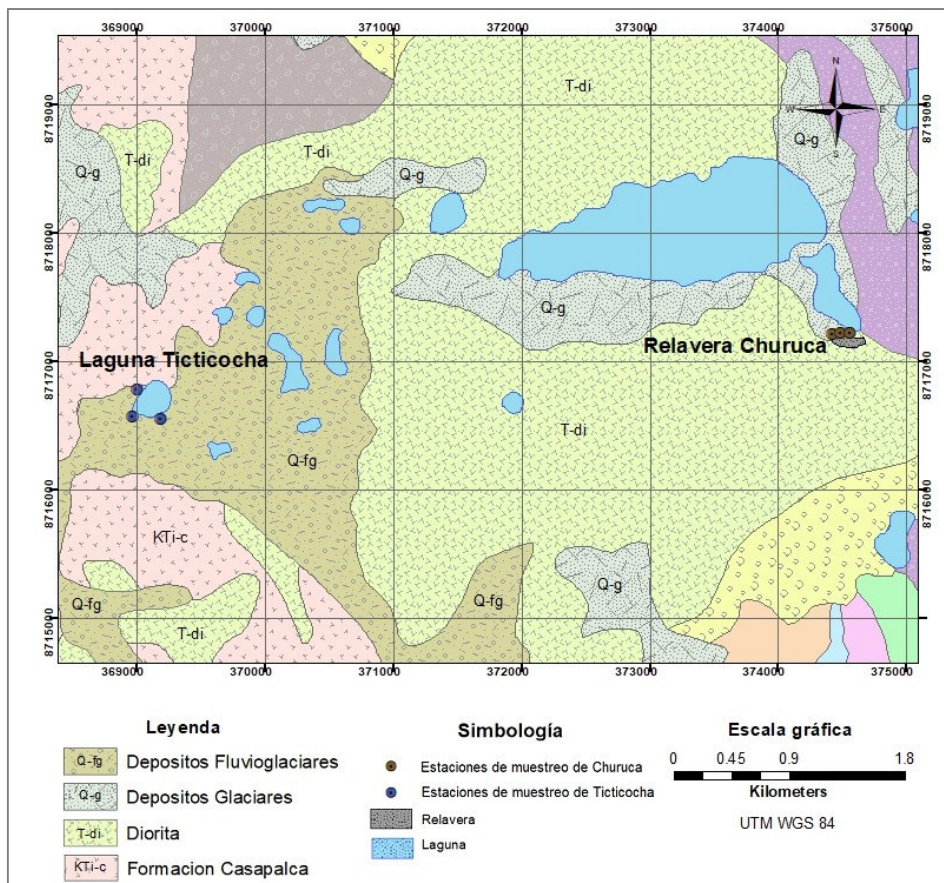


Figura 2 Esquema geológico del área de estudio y ubicación de los puntos evaluados

4.1.3.1. Geología local

Dentro del marco estratigráfico en el cual está emplazada el área de estudio se ha podido reconocer la formación Casapalca, producto de la erosión post-fase Tectónica Peruana. Mientras que la actividad magmática se manifiesta mediante la intrusión de

grandes masas plutónicas, estas constituyen la Zona Marginal Oriental del Batolito de la costa cuyas rocas han sido clasificadas como dioritas. Asimismo, las rocas ígneas están cubiertas de secuencias cuaternarias como los depósitos glaciares y fluvioglaciares (INGEMMET, 1983; Figura 2).



Figura 3 Plano hidrogeológico del área de estudio y ubicación de los puntos evaluados

4.1.3.1. Hidrogeología

Los datos hidrogeológicos permiten analizar la capacidad del acuífero de contener y transmitir las aguas subterráneas. La zona que incluye a la laguna Ticticocha se encuentra la unidad Hidrogeológica clasificada como Acuífero Fisurado Sedimentario que se caracteriza por formaciones consolidadas fisuradas de permeabilidad media (INGEMMET 2006). Mientras que la zona donde se encuentra la laguna Churuca se encuentra limitada por rocas de permeabilidad insuficiente clasificada como Acuitardo Volcánico (Figura 3).

4.1.4. Aspecto biológico

En la presente sección se presenta las características relacionadas a la flora del área de estudio, que incluye tanto a la laguna Ticticocha como Churuca.

4.1.4.1. Zonas de vida

La determinación de las zonas de vida se basó en el uso de la Guía Explicativa: Mapa Ecológico del Perú (INRENA, 1995), esta información se corroboró con la visita a campo, de manera que el área de estudios se clasifica como Tundra Pluvial – Alpino Tropical (tp – AT).

Tundra pluvial – Alpino Tropical (Tp-AT)

Se extiende entre los 4 300 y 5 000 msnm a lo largo de la Cordillera de los Andes, presenta una biotemperatura media anual de 3.2 °C, con una precipitación total por año de 1 020.2 mm y el promedio mínimo de 687.9 mm, se ubica en la provincia de humedad: Súper-húmedo.

Presenta un relieve topográfico accidentado, variando a colinado u ondulado, con una vegetación muy abundante y florísticamente diversificada, conteniendo arbustos, semiarbustos y hierbas de tipo graminal, así como plantas arroseradas y de porte almohadillado. En esta zona de vida existen especies como *Calamagrostis vicunarum*, *Aciachne pulvinata*, *Poa chamaeclinos*, *Anthochloa lepidula*, *Descurainia athroocarpa*, *Lupinos pinguis*, *Apium scabrum*, *Leuceria laciniata*, y especies de los géneros *Culcitium* y *Senecio*. Teniendo a *Distichia muscoides* de la familia Juncácea como especie característica de esta zona.

4.1.4.2. Ecorregiones

Una ecorregión es un área geográfica que se caracteriza por presentar condiciones bastante homogéneas en lo referente a clima, suelos, hidrología, flora y fauna, donde los diferentes factores actúan en estrecha interdependencia (Brack, 1986). Para el

territorio peruano se reconocen 11 ecorregiones; y el área de estudio se ubica dentro de la ecorregión Puna.

Ecorregión Puna

Corresponde a las partes altas de los andes, en promedio, desde los 3800 m hasta los 6 700 m de altitud. Su clima es frío y la luz solar fuerte. El ichu es el pasto más extendido. Los vientos que soplan todo el tiempo hacen que la temperatura sea baja y el ambiente seco. Posee un clima muy duro, caracterizado por grandes variaciones de temperatura: frío intenso en las noches y calor durante el día. Abundan las lagunas color esmeralda, los grandes salares, y se forman gran parte de los ríos que recorren nuestro país (Brack, 1986).

4.2. MATERIALES

Se han estudiado individuos de *Senecio rufescens* y el suelo asociado a sus raíces (suelo rizosférico). Los ejemplares de *S. rufescens* fueron colectados alrededor de las lagunas seleccionadas.

Senecio rufescens DC

Pertenece a la familia Asteraceae. Es un arbusto muy ramoso de 40-60 cm de altura no rizomatoso. Últimas ramificaciones no divaricadas. Tomento laxamente aracnoideo. Hojas simples, alternas, sésiles, algo carnosas, lineares a linear-lanceoladas y son pubescentes en ambas caras. Capítulos discoides, solitarios o formando cimas laxas 2-4 céfalas en los ápices de las ramas. Pedicelos bracteolados. Involucro acampanado, caliculado. Filarias 10-16, lineal-oblongas, agudas glanduloso-pubescente en el dorso. Flores amarillas numerosas, hermafroditas de corola tubulosa. Aquenios glabros. Pappus blando (Beltrán y Roque, 2015; Cabrera, 1985).

Es una especie de amplia distribución, desde el centro del Perú hasta el norte de Argentina principalmente habita en la puna cerca al piso subnival. En el Perú se ha reportado en Áncash, Junín, Lima, Arequipa y Puno, entre los 3500 a 4500 m y en Lima

ha sido registrada en las provincias de Canta, Huarochirí y Yauyos (Beltrán y Roque, 2015).



Fotografía 1 Porte de *Senecio rufescens* DC en la laguna Ticticocha, Lima

4.3. METODOLOGÍA

4.3.1. Selección de las estaciones de muestreo

El trabajo de campo se realizó a finales de la temporada seca del año 2016 (última semana de octubre). Se recorrieron las zonas alrededor de ambas lagunas diferenciando a simple vista las unidades vegetacionales representativas de *Senecio rufescens*. Las estaciones de muestreo fueron seleccionadas en función de la accesibilidad del terreno y la presencia de la especie. Es decir, se priorizaron las áreas más accesibles cuya presencia de *S. rufescens* fue predominante, pues indicaría la capacidad que poseen para desarrollarse naturalmente en esas zonas, por lo tanto la ubicación de las estaciones de muestreo fueron realizados de un modo preferencial (Matteucci y Colma, 1982). En cada laguna se establecieron tres estaciones de muestreo, en posiciones topográficas similares (altitud, pendiente, orientación).

4.3.1.1. Laguna Ticticocha

Para realizar estudios acerca de la acumulación de metales pesados en plantas que crecen en suelos contaminados es necesario tener una referencia de los suelos cuando están libres de contaminantes (Durán, 2010). Por lo expuesto en la sección anterior, los suelos de los alrededores de la laguna Ticticocha son considerados de escasa o nula influencia antrópica (Fotografía 2), y se asume que las concentraciones de metales pesados obtenidas representan los contenidos naturales de metales en los suelos, lo que proveería una visión del comportamiento de *Senecio rufescens* bajo condiciones donde aparentemente no existe contaminación.



Fotografía 2 Vista panorámica de la laguna Ticticocha, Lima

Siguiendo los criterios establecidos, se ubicaron tres estaciones de muestreo alrededor de la laguna Ticticocha (Tabla 1). La primera estación de muestreo estuvo aproximadamente a 95 metros de la carretera, la segunda estación se ubicó por debajo de una pequeña pendiente y cerca de un desmonte de suelo removido probablemente por algún tipo de deslizamiento. La tercera estación de muestreo no presentó ningún tipo de perturbación.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de muestreo alrededor de la laguna Ticticocha.

Unidad de Muestreo	Coordenadas UTM 18L		Descripción
	Este	Norte	
P1	368973	8716573	Estación más cercana a la carretera
P2	369014	8716783	Estación cercana a un desmonte
P3	369193	8716548	Estación más alejada

•P1, estación de muestreo 1; P2, estación de muestreo 2; P3, estación de muestreo 3.

4.3.1.2. Laguna Churuca

El escaso nivel del espejo de agua de esta laguna, asociadas con amplias zonas de suelo desnudo y poca presencia de vegetación indicarían contaminación del ecosistema debido a las actividades mineras (Fotografía 3), tal como se detalla en la sección anterior.



Fotografía 3 Vista panorámica de la laguna Churuca, Junín

Las tres estaciones de muestreo se ubicaron de forma paralela a la carretera, debido a la difícil accesibilidad para la zona opuesta de la laguna (Tabla 2). La primera estación de muestreo estuvo aproximadamente a 36 metros de la carretera, las plantas de este punto estuvieron muy cerca de las tuberías de descarga, el segundo punto se ubicó a 60 metros del primero y a aproximadamente 27 metros de la carretera. Finalmente el

tercer punto de muestreo se ubicó cerca a zonas de suelo removido probablemente por algún medio de transporte.

Tabla 2 Ubicación de las estaciones de muestreo alrededor de la laguna Churuca.

Unidad de Muestreo	Coordenadas UTM 18L		Descripción
	Este	Norte	
P1	369877	8717436	Estación más cercana a la carretera
P2	369825	8717347	Estación cercana a un desmonte
P3	369869	8717267	Estación más alejada

•P1, estación de muestreo 1; P2, estación de muestreo 2; P3, estación de muestreo 3.

4.3.2. Diseño de muestreo

4.3.2.1. Muestreo de *Senecio rufescens* DC

En cada laguna se colectaron cinco individuos completos (parte aérea y raíz) de *Senecio rufescens* por cada estación de muestreo, tal como se realizó en un estudio similar (Bech et al., 2015), es decir en suma se colectaron quince muestras por cada laguna. Cada planta fue escogida a simple vista de acuerdo a dos criterios principales: visible ausencia de síntomas de fitotoxicidad (clorosis o enanismo) y similaridad en la altura (el tamaño de la planta indicaría tiempos de vida cercanos). Se colectaron individuos completos, teniendo especial cuidado al separar las plantas del sustrato, procurando no producir ningún tipo de daño en sus estructuras, a continuación fueron envueltos en bolsas de papel kraft, colocados en bolsas herméticas, etiquetados (fecha, nombre de la laguna, estación de muestreo y número de réplica) y transportados en refrigeración hasta el laboratorio.

Los cinco individuos de cada estación de muestreo fueron mezclados en el laboratorio para los análisis posteriores, de manera que se tuvieron tres réplicas por laguna, cada una compuesta por cinco plantas (submuestras). En cada laguna se colectaron dos especímenes adicionales que fueron prensados, herborizados y, finalmente depositados en el Herbario San Marcos (USM), de acuerdo a las técnicas convencionales (Smith, 1971).

4.3.2.2. Muestreo de suelo

Se colectaron muestras de suelo que estuvieron en contacto directo con las raíces de todas las plantas colectadas (suelo rizosférico), mediante una operación simple: después de colectar las plantas se agitaban las raíces delicadamente para eliminar residuos de suelo adherido (Boechat et al., 2015) y se recogía la muestra encontrada entre 0 y 30 cm de profundidad (Volke Sepúlveda et al., 2005), dependiendo del espacio radicular de cada ejemplar. Siendo poca la cantidad de suelo que se pudo extraer con esta técnica fue necesario obtener muestras adicionales de las zonas rizosféricas de individuos de *S. rufescens* que no fueron considerados dentro de este estudio, es decir, se tomaron submuestras de las zonas radicales de diez plantas en cada estación de muestreo, que al mezclarlas y cuartearlas formaron tres muestras compuestas para cada laguna, de acuerdo al sistema de muestreo bidimensional recomendado para la toma de muestras superficiales (MINAM, 2014).

Se colectaron aproximadamente 2kg de muestras compuestas en cada estación de muestreo, fueron depositadas en bolsas herméticas de polietileno, etiquetadas con cuidado (indicando fecha, nombre de la laguna, estación de muestreo y número de réplica) y posteriormente transportadas en refrigeración hasta el laboratorio para su análisis.

4.3.3. Procesamiento de muestras en el laboratorio

Las muestras vegetales y de suelo fueron almacenadas dentro del laboratorio de Fitología Aplicada de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, hasta su procesamiento.

Las muestras vegetales fueron mantenidas en una congeladora a una temperatura aproximada de 4°C y las muestras de suelo se mantuvieron dentro de un cooler en un lugar fresco y seco a temperatura ambiente.

4.3.3.1. Procesamiento y preparación de las muestras de suelo

Las muestras de suelo fueron tamizadas empleando tamices de acero inoxidable de 2 mm, depositadas en bandejas debidamente etiquetadas y forradas con papel kraft, donde se pusieron a secar a temperatura ambiente durante aproximadamente dos semanas. Finalmente, se separó un poco de cada muestra dentro de bolsas herméticas, se etiquetaron adecuadamente y se enviaron al laboratorio Servicios Analíticos Generales SAC (SAG Perú) acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) para cuantificar el contenido de arsénico, cadmio, cobre y plomo mediante ICP-AES (espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplado inductivamente) de acuerdo al método estandarizado EPA 200.7, Rev.4.4. EMMC Version, 1994.

Las muestras restantes de suelo se llevaron al Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina para la determinación de los parámetros físico-químicos escogidos: pH, conductividad eléctrica, textura y materia orgánica (Bech et al., 2012; Intawongse y Dean, 2006). Se aplicaron las metodologías convencionales para el cálculo de cada una, es decir para la determinación textural se empleó la técnica de Bouyoucos, la materia orgánica (MO) se determinó por combustión húmeda (Walkley-Black), el pH y la conductividad eléctrica (CE) en suspensión se hallaron por métodos potenciométricos (relación 1:2,5) y conductimétricos (relación 1:5), respectivamente (Durán, 2010; Gilabert et al., 1990).

4.3.3.2. Procesamiento y preparación de las muestras vegetales

Cada espécimen de *Senecio rufescens* fue lavado dos veces durante aproximadamente tres minutos dentro de bandejas. En el primer lavado se utilizó agua potable para retirar residuos de materia orgánica y sedimento y en el segundo enjuague se empleó agua destilada con el fin de limpiar las partículas de polvo y de suelo adheridas a la planta, dejando escurrir para eliminar el exceso de agua. Una vez limpias se procedió a separar todas las plantas en raíz y parte aérea (hojas y tallos), fueron debidamente etiquetadas

de acuerdo a la laguna de procedencia, estación de muestreo y número de réplica e inmediatamente se pusieron a secar tendidas sobre papel kraft a temperatura ambiente.

Al cabo de dos días, fueron recogidas y colocadas entre hojas de papel toalla, las veces que fueron necesarias para eliminar el exceso de humedad y se colocaron dentro de sobres de papel en una estufa a 60°C durante 3 días. Finalmente, las plantas secas que pertenecían a la misma estación de muestreo fueron molidas y mezcladas para la formación de las muestras compuestas, tanto a nivel de su parte aérea como de sus raíces. Se separaron 20 g de cada muestra para realizar el análisis de metales pesados como muestras independientes, es decir las muestras vegetales que se mandaron a analizar estuvieron constituidas por 12 réplicas. Las muestras secas restantes fueron almacenadas en desecadores herméticos de vidrio con sílica gel.

El contenido de arsénico, cadmio, cobre y plomo de todas las muestras de *Senecio rufescens* fueron analizadas mediante el método ICP-AES (espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplado inductivamente) por el Instituto de Corrosión y Protección de la Universidad Pontificia Católica del Perú (ICP-PUCP) cuyo laboratorio se encuentra acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL)

4.3.4. Cálculo de los índices de valoración de tolerancia de *Senecio rufescens* a los metales pesados

Para conocer el uso potencial de *Senecio rufescens* en técnicas de fitorremediación, se calculó el factor de bioconcentración (FBC) y de translocación (FT). Estos valores permiten evaluar la eficiencia de las plantas en la acumulación de metales pesados (Zayed et al., 1998).

Factor de bioconcentración (FBC) indica la eficiencia de una planta en absorber metales pesados del sustrato y acumularlos en sus tejidos. En este estudio se consideró la relación entre la concentración de metales pesados en el tejido de la parte aérea y la del suelo. Se calculó como sigue (Zayed et al., 1998).

$$FBC = \frac{C_{\text{parte aérea}}}{C_{\text{suelo}}}$$

Donde $C_{\text{parte aérea}}$ es la concentración del metal objetivo (As, Cd, Cu, Pb) en el tejido de la parte aérea de la planta y C_{suelo} es la concentración del metal respectivo en el suelo.

Factor de translocación (FT) indica la eficiencia de la planta en la translocación de los metales pesados acumulados de las raíces a la parte aérea. Es la relación entre la concentración del metal pesado en el vástago (tallo y hojas) y la de sus raíces. Se calculó de la siguiente manera (Padmavathiamma y Li, 2007; Adesodun et al., 2009)

$$FT = \frac{C_{\text{parte aerea}}}{C_{\text{raiz}}}$$

Donde $C_{\text{parte aérea}}$ es la concentración del metal objetivo (As, Cd, Cu, Pb) en el tejido de la parte aérea de la planta y C_{raiz} es la concentración del metal respectivo en la raíz.

4.3.5. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa SPSS versión 22. En primer lugar, se efectuó la estadística descriptiva, calculando las medias y las desviaciones estándar (SD) de las concentraciones de metales pesados (As, Cd, Cu, Pb) en las plantas y en el suelo, para cada laguna. Luego se analizó la normalidad de las concentraciones de metales en los tejidos vegetales y en el suelo de cada laguna, así como los valores de FBC y FT obtenidos para cada metal mediante la prueba de Shapiro-Wilks.

La capacidad de acumulación de metales pesados en *S. rufescens* se analizó en función a los tejidos vegetales y a la concentración natural de metales en los suelos dada por dos lagunas diferentes, así como por el cálculo de índices de acumulación (BCF y TF). La evaluación de la posible existencia de diferencias significativas en el contenido de metales y los valores de los índices de acumulación entre ambas lagunas se realizó aplicando el test T de Student, que compara la media de dos grupos de casos para muestras independientes.

5: RESULTADOS

5.1. Principales propiedades físico-químicas del suelo

El análisis de los suelos rizosféricos superficiales (0-30 cm) en los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca mostró pequeñas diferencias entre las propiedades físico-químicas evaluadas (Figura 4), y éstas no fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

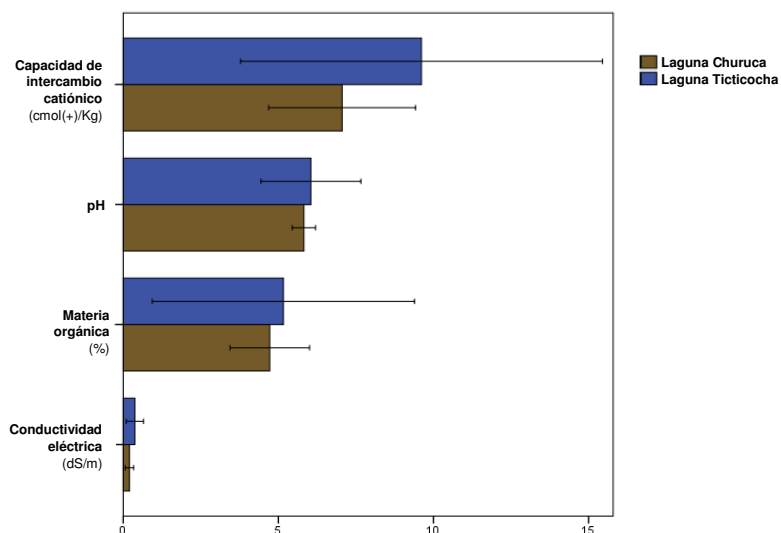


Figura 4 Propiedades químicas de los suelos rizosféricos de los alrededores de las dos lagunas evaluadas.

Las barras de error representan la desviación estándar. $n=3$.

El pH de los suelos rizosféricos de las inmediaciones de la laguna Ticticocha indicó que son suelos moderadamente ácidos, mientras que los de la laguna Churuca se clasifican como ligeramente ácidos (pH promedio 6.1 y 5.8, respectivamente; SSDS, 1993). Contrario a lo que se esperaba, uno de los puntos cercanos a la laguna Ticticocha registró el valor más ácido (pH = 4.89, Tabla 3).

En general, ambos suelos muestran elevada cantidad de materia orgánica (5.16% y 4.72%, para Ticticocha y Churuca respectivamente), de acuerdo a los valores estándar para suelos no volcánicos que clasifica como alto a los porcentajes de 3.6 a 6.0 (Fernández et al., 2006) y para los suelos arenosos y franco arenosos, como es el caso de las muestras colectadas, los porcentajes entre 3.0 y 5.15 también son considerados como altos (Hazelton y Murphy, 2007).

Tabla 3 Análisis de las propiedades químicas de los suelos rizosféricos en los tres puntos de muestreo en los alrededores de la laguna Ticticocha.

Puntos de muestreo	pH	Materia orgánica	Conductividad eléctrica	CIC total
	1:1 H ₂ O	%	1:1 dS/m	Cmol(+)/Kg
P1	7.89	2.2	0.24	16.33
P2	5.37	3.28	0.07	6.69
P3	4.89	10.0	0.19	5.82
Media aritmética	6.05	5.16	0.17	9.61
Desviación estándar	1.61	4.22	0.28	5.83

•CIC total, capacidad de intercambio catiónico total

••Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM

Por otra parte, todos las estaciones de muestreo registraron poca cantidad de sales solubles en los suelos rizosféricos con un promedio de 0.17 dS/m para Ticticocha y 0.20 dS/m para Churuca, lo que indica que son suelos sin problemas de salinidad (SSDS, 1993). Además, los suelos presentaron una escasa capacidad de retención de cationes totales (CIC Total) puesto que los niveles promedio en ambas localidades se encuentran en el rango del 0-10 (Garrido, 1994), siendo 9.61 y 7.06 Cmol(+)/Kg para Ticticocha y Churuca, respectivamente (Tabla 3 y Tabla 4).

Tabla 4 Análisis de las propiedades químicas de los suelos rizosféricos en los tres puntos de muestreo en los alrededores de la laguna Churuca.

Puntos de muestreo	pH	Materia orgánica	Conductividad eléctrica	CIC total
	1:1 H ₂ O	%	1:1 dS/m	Cmol(+)/Kg
P1	6.04	6.15	0.35	9.6
P2	6.04	4.35	0.16	6.65
P3	5.39	3.67	0.09	4.92
Media aritmética	5.82	4.72	0.20	7.06
Desviación estándar	0.38	1.28	0.13	2.37

•CIC total, capacidad de intercambio catiónico total

••Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM

El análisis de granulometría mostró que todos los suelos rizosféricos tuvieron textura moderadamente gruesa, con un porcentaje promedio de arena mayor al 50% en todos los puntos de muestreo (Tabla 5). Así, al promediar los valores de arcilla, limo y arena correspondientes a estos puntos y según el triángulo textural estandarizado por el

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), están clasificados como suelos franco arenosos.

Tabla 5 Fracciones minerales (arena, limo y arcilla) promedio de los suelos rizosféricos en los alrededores de las lagunas evaluadas.

Puntos de muestreo	Arena	Limo	Arcilla
	%		
Ticticocha	64.84 ± 4.1	26.11 ± 2.9	9.05 ± 3.1
Churuca	64.96 ± 9.2	27.42 ± 6.9	7.62 ± 3.5

•Media ± Desviación estándar. n=3.

••Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM

5.2. Metales pesados en los suelos rizosféricos

El contenido de los metales pesados evaluados en los suelos rizosféricos de ambas lagunas se presentan en el siguiente orden decreciente: Pb>>Cu>As>>>Cd (Figura 5 y Figura 6). Esto indica que los niveles promedio de plomo y cobre superan las concentraciones de los demás metales analizados, en todas las estaciones de muestreo (Tabla 6 y Tabla 7).

Tabla 6 Concentración de metales pesados (mg·kg⁻¹) en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha.

Puntos de muestreo	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
P1	267.9	4.9	216.1	518.8
P2	483.7	5.4	179.0	1303.0
P3	564.9	7.4	1147.8	1525.3
Media aritmética	438.83	5.85	514.3	1115.67
Desviación estándar	153.5	1.32	548.94	528.72

•Todos los valores representan concentraciones totales.

••Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG Perú S.A.C.).

El contenido de cadmio, cobre y plomo resultó ser mayor en los suelos de Churuca, en comparación con los suelos de Ticticocha (Figura 4 y Figura 5) lo cual era de esperarse dado que los suelos de los alrededores de la laguna Churuca se ven afectados por las actividades mineras. Mientras que los niveles de arsénico en los suelos de Ticticocha

fueron mayores a los de Churuca (438.8 mg·kg⁻¹ y 412 mg·kg⁻¹, respectivamente). Sin embargo estas diferencias no fueron significativas a nivel estadístico (p>0.05).

Tabla 7 Concentración de metales pesados (mg·kg⁻¹) en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Churuca.

Puntos de muestreo	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
P1	351.00	10.00	786.60	2348.30
P2	591.30	11.80	604.70	2118.80
P3	293.80	4.08	278.30	570.27
Media aritmética	412.03	8.60	556.53	1679.12
Desviación estándar	157.86	4.02	257.55	967.12

• Todos los valores representan concentraciones totales

•• Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG Perú S.A.C.).

El cadmio resultó ser el metal más escaso en todos los puntos muestreados y sus valores fueron muy similares entre sí (desv. est., 1.32 y 4.02 para Ticticocha y Churuca, respectivamente; Tabla 6 y Tabla 7).

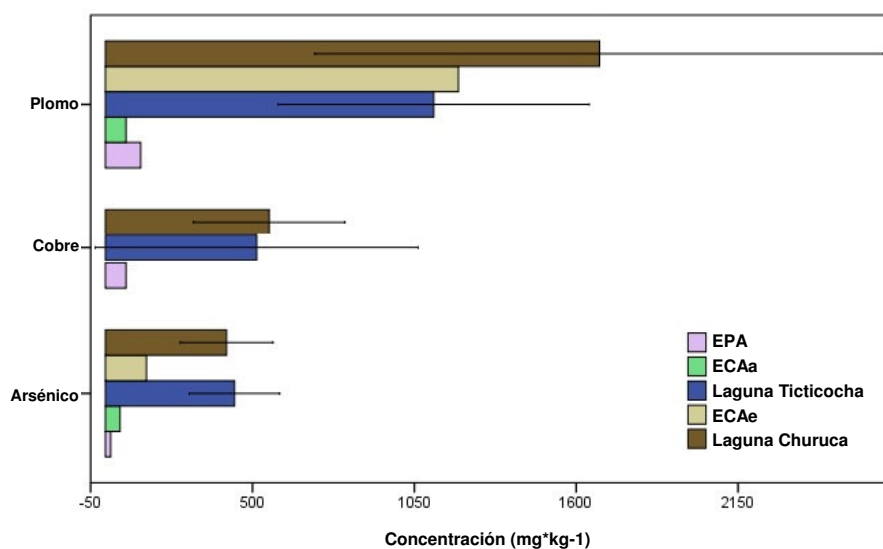


Figura 5 Concentración de metales pesados totales en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.

EPA: Environmental Protection Agency (US EPA 2005a, 2005c, 2007); ECAa, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú. Valores para suelos de uso Agrícola (DS-002-2013-MINAM, 2013); ECAe, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú. Valores para suelos de uso Comercial, Industrial, Extractivos (DS-002-2013-MINAM, 2013). Las barras de error representan la desviación estándar. n=3.

Por otra parte, la concentración de metales registrada en los suelos de ambas lagunas superan los valores estándares de suelos naturales y no contaminados de acuerdo a

legislaciones internacionales (Alloway, 2013; Dudas, 1984; Kabata-Pendias, 2011; Tabla 9). Asimismo, se observó que los suelos asociados a ambas lagunas presentan concentraciones de arsénico, cobre y plomo que sobrepasan los límites máximos que representan un riesgo ecológico inaceptable para las plantas (US EPA, 2005a, 2007, 2005c). Al comparar las concentraciones registradas en Ticticocha e indican un riesgo para la protección de la salud ambiental y humana, pues fueron mucho más altos que los valores recomendados (CCME, 1999).

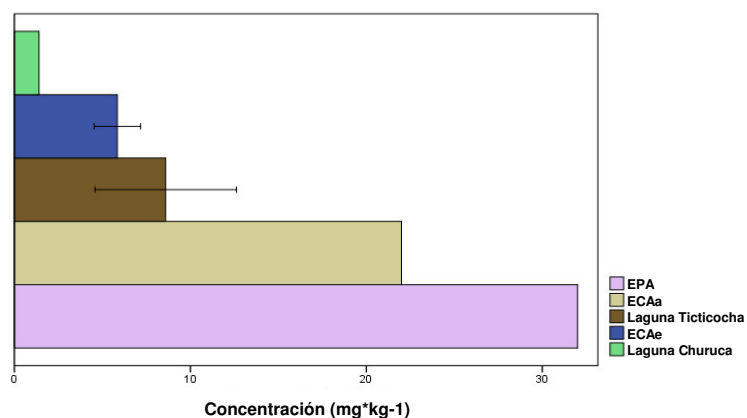


Figura 6 Concentración de cadmio en los suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.

EPA: Environmental Protection Agency (US EPA, 2005b); ECAa, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú. Valores para suelos de uso Agrícola (DS-002-2013-MINAM, 2013); ECAe, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú. Valores para suelos de uso Comercial, Industrial, Extractivos (DS-002-2013-MINAM, 2013). Las barras de error representan la desviación estándar. n=3.

Se observó que el cadmio, arsénico y plomo de los suelos rizosféricos de Ticticocha presentan concentraciones que superan lo establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) de suelo para uso agrícola en todas las estaciones (DS-002-2013-MINAM 2013). De igual manera, el contenido de arsénico y plomo de los suelos rizosféricos de Churuca superan los valores establecidos para los ECAs para suelos de uso extractivo (Tabla 8).

Por otro lado, el contenido promedio de cadmio de ambas lagunas (5.85 mg·kg⁻¹ para Ticticocha y 8.60 mg·kg⁻¹ para Churuca) no constituyen un riesgo para el desarrollo de las plantas (US EPA, 2005a, 2007, 2005c), pero representan un riesgo para la

protección de la salud ambiental y humana en el caso de los valores registrados en Ticticocha (CCME, 1999). De igual forma, al compararlos con los ECAs para suelos de uso agrícola y extractivo, para Ticticocha y Churuca respectivamente (DS-002-2013-MINAM, 2013), solo representan un riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente el contenido de cadmio en el suelo rizosférico de Ticticocha (Tabla 8, Figura 6).

Tabla 8 Concentración promedio de metales pesados en suelos de los alrededores de la laguna Ticticocha y valores comparativos de acuerdo a la legislación nacional e internacional.

Referencia	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
Laguna Ticticocha	438.83 ± 153.50	5.85 ± 1.32	514.30 ± 548.94	1,115.67 ± 528.72
Laguna Churuca	412.03 ± 157.86	8.60 ± 4.02	556.53 ± 257.55	1,679.12 ± 967.12
ECA ^a	50.00	1.40	Ne	70.00
ECA ^b	140.00	22.00	Ne	1,200.00
CCME ^c	12.00	1.40	63.00	70.00
CCME ^d	12.00	22.00	91.00	600.00
Concentraciones en suelos del mundo ^e	6.83	0.41	38.90	27.00
Concentraciones de referencia para suelos no contaminados	7.2 ¹	0.1 – 1.0 ²	2 - 50 ²	17.00 ²
Límites máximos de concentración ^f	18.00	32.00	70.00	120.00

• Valores representan concentraciones totales y están expresados en mg•kg⁻¹

• Media ± SD (n=3). Ne: No establecido.

^a ECA, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú. Valores para suelos de uso Agrícola.

^b Valores para suelos de uso Comercial, Industrial, Extractivos. ECA Fuente: (DS-002-2013-MINAM, 2013)

^c Concentración de metales en el suelo para la protección de la salud ambiental y humana. Valores estándar para suelos de uso agrícola.

^d Valores estándar para suelos de uso industrial. Fuente: Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, 1999)

^e Fuente: Kabata-Pendias, 2011

^f Concentración de metales en el suelo que representa un riesgo ecológico inaceptable para las plantas. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (US EPA 2005a, 2005b, 2007, 2005c)

¹ Fuente: Dudas, 1984, ² Fuente: Alloway, 2013

5.3. Acumulación de metales pesados en los tejidos de *Senecio rufescens*

Las plantas de *S. rufescens* colectadas a los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca presentan la siguiente tendencia de acumulación en sus tejidos: $Pb > Cu > As > Cd$, excepto por la concentración promedio de cobre en los tejidos de las plantas colectadas en Churuca que es mayor al contenido de plomo en los tejidos de la parte aérea de las plantas del mismo lugar (Figura 7).

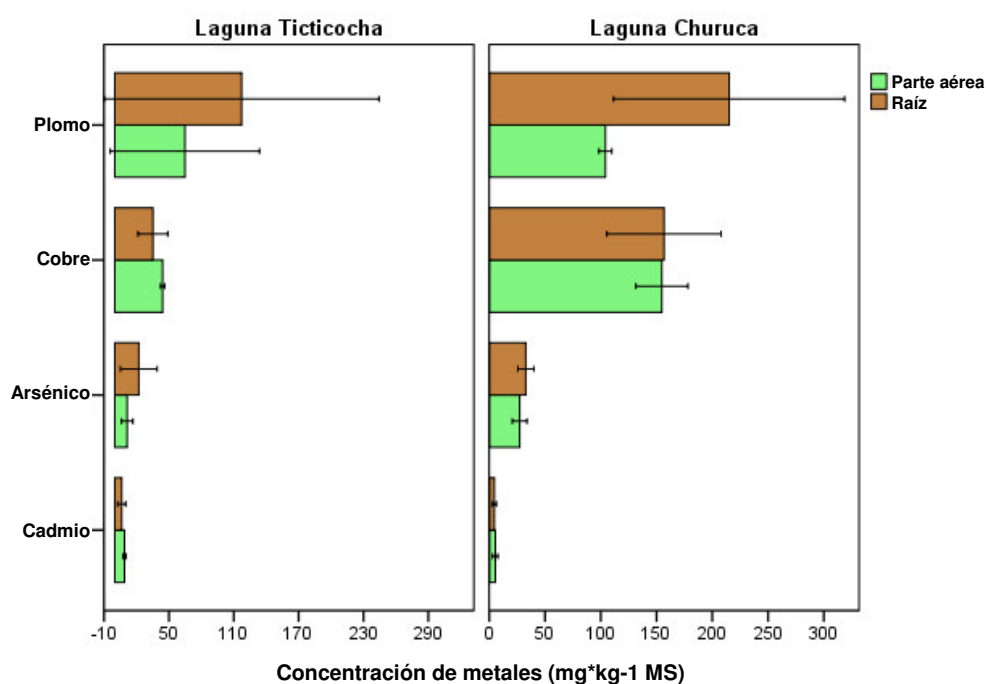


Figura 7 Concentración de metales pesados ($mg \cdot kg^{-1} MS$) en los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca.

Las barras de error representan la desviación estándar. $n=3$.

5.3.1. Arsénico

La concentración promedio de arsénico en los tejidos radicales de las plantas colectadas en Ticticocha y Churuca fueron superiores a las registradas en la parte aérea (Figura 8), sin embargo esta diferencia no fue significativa a nivel estadístico ($p > 0.05$).

En general, las plantas de Churuca acumulan mayor cantidad de arsénico que las plantas que crecen alrededor de la laguna Ticticocha, tanto en sus tejidos aéreos como en sus raíces, sin embargo la diferencia solo es significativa entre los tejidos de la parte aérea de las plantas de ambas localidades (Figura 8).

Tabla 9 Concentración de arsénico ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS) en los tejidos de *Senecio rufescens* que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.

Puntos de muestreo	Ticticocha		Churuca	
	PA	R	PA	R
P1	6.96	15.02	19.88	30.9
P2	17.38	41.49	29.21	40.8
P3	9.90	9.82	32.64	26.9
Media aritmética	11.41	22.11	27.24	32.84
Desviación estándar	5.37	16.98	6.60	7.14

• PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

•• Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG Perú S.A.C.).

En general los niveles críticos de toxicidad para arsénico en plantas está establecida en el rango de $<2 - 80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS (Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007; Krämer, 2010) y por lo tanto las concentraciones promedio en la parte aérea de las plantas de Ticticocha y Churuca serían considerados como excesivos o tóxicos, dado que registran 11.4 y $27.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS, respectivamente (Tabla 9).

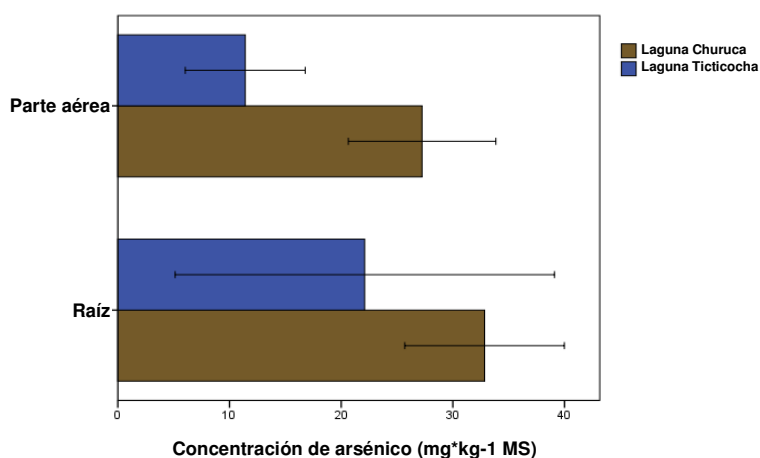


Figura 8 Concentración total de arsénico en los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

•Las barras de error representan la desviación estándar. $n=3$.

5.3.2. Cadmio

Las concentraciones de cadmio en las plantas de Ticticocha y Churuca mostraron los niveles más bajos registrados en los tejidos vegetales al compararlos con la acumulación de los demás metales, tanto en la parte aérea como en la raíz, Incluso en el primer punto de muestreo las concentraciones de cadmio en los tejidos vegetales

fueron tan bajos que no pudieron ser detectados en el análisis ($<0.100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ MS}$; Tabla 10). Además las plantas colectadas en la laguna Churuca presentaron menos concentración de cadmio en comparación con las plantas de Ticticocha, sin embargo esta diferencia no fue estadísticamente significativa (Figura 6).

Tabla 10 Concentración de cadmio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ MS}$) en los tejidos de *Senecio rufescens* que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.

Puntos de muestreo	Ticticocha		Churuca	
	PA	R	PA	R
P1	-	-	3.9	3.9
P2	7.79	8.98	4.0	3.5
P3	9.90	3.73	8.21	6.53
Media aritmética	8.85	6.36	5.38	4.65
Desviación estándar	1.49	3.71	2.45	1.64

• PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

•• Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG Perú S.A.C.).

Con respecto a los órganos de acumulación, las plantas de ambas localidades mostraron mayor concentración de cadmio en la parte aérea que en la raíz, aunque la diferencia entre sus valores fue muy leve y no presentaron significancia estadística (Figura 9).

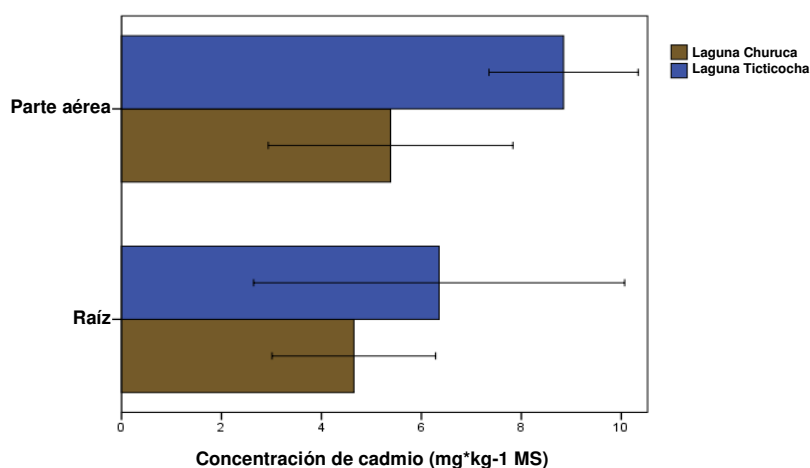


Figura 9 Concentración total de cadmio en los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

•Las barras de error representan la desviación estándar. n=3.

Además, la concentración en los tejidos aéreos obtenido en las plantas de las dos lagunas se encuentra dentro del rango de 6 - 10 mg·kg⁻¹ MS considerado como tóxico para las plantas en general (Krämer 2010), sin embargo ninguna de las plantas mostró síntomas visibles de fitotoxicidad.

5.3.3. Cobre

Los valores de acumulación de cobre en la parte aérea de las plantas colectadas alrededor de la laguna Ticticocha resultaron muy parecidos entre sí (desv. est., 1.85), siendo ligeramente superiores a la acumulación en los tejidos radicales (Tabla 11). Mientras que las plantas de la laguna Churuca tuvieron más concentración de este metal en las raíces que en los tejidos aéreos, aunque la diferencia entre sus valores promedio fue muy poca.

Tabla 11 Concentración de cobre (mg·kg⁻¹ MS) en los tejidos de *Senecio rufescens* que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.

Puntos de muestreo	Ticticocha		Churuca	
	PA	R	PA	R
P1	43.56	34.92	131.4	204.4
P2	46.15	49.08	155.1	102.4
P3	42.56	21.61	178.03	163.17
Media aritmética	44.09	35.20	154.82	156.64
Desviación estándar	1.85	13.74	23.34	51.31

• PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

•• Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG Perú S.A.C.).

Al comparar las concentraciones obtenidas en los tejidos de las plantas colectadas en Ticticocha y Churuca, se observaron diferencias significativas entre estos valores, siendo las plantas de Churuca las que acumularon casi tres veces más de cobre que las plantas de Ticticocha (Figura 10)

Generalmente, el contenido de cobre en los tejidos aéreos de las plantas no exceden los 20 mg·kg⁻¹ MS y los valores entre 20 y 100 mg·kg⁻¹ MS son usualmente considerados como tóxicos para las plantas (Kabata-Pendias, 2011), como es el caso de los tejidos

aéreos de *Senecio rufescens* de Ticticocha y Churuca, que acumularon un promedio de 44.09 y 154.82 mg·kg⁻¹ MS, respectivamente (Tabla 11, Figura 10).

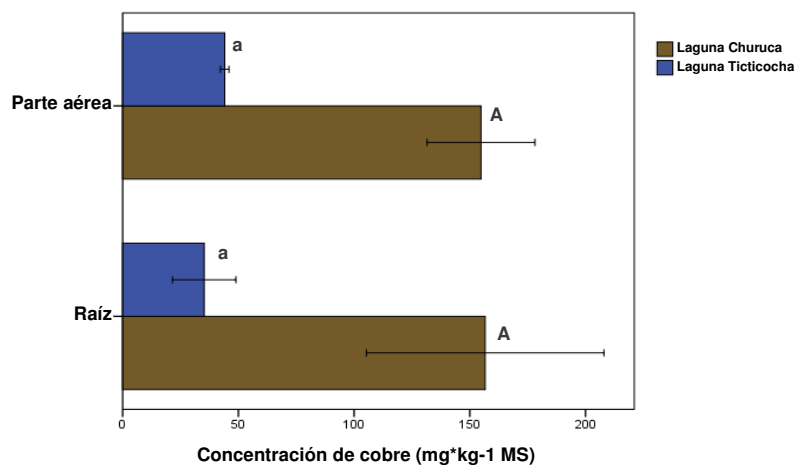


Figura 10 Concentración total de cobre en los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

•Las barras de error representan la desviación estándar. n=3.

5.3.4. Plomo

La cantidad promedio de plomo en las raíces de las plantas colectadas en Churuca y Ticticocha fue casi el doble de la concentración registrada en la parte aérea (Figura 11) No obstante, el análisis de medias determinó que estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

Tabla 12 Concentración de plomo (mg·kg⁻¹ MS) en los tejidos de *Senecio rufescens* que crecen alrededor de las lagunas evaluadas.

Puntos de muestreo	Ticticocha		Churuca	
	PA	R	PA	R
P1	19.10	40.19	97.6	330.5
P2	144.26	263.93	108.6	184.7
P3	31.08	47.73	106.12	129.94
Media aritmética	64.81	117.28	104.11	215.04
Desviación estándar	69.06	127.06	5.74	103.68

• PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

•• Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG Perú S.A.C.).

Al igual que el cobre, los niveles promedio de plomo fueron mayores en las plantas que crecieron cerca de la laguna Churuca que en las plantas de la laguna Ticticocha (Figura

9), destacando la concentración de plomo en las raíces de las plantas de Churuca donde alcanzaron el valor más elevado ($215 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Tabla 12).

Por otra parte se observó que los tejidos aéreos de las plantas colectadas en las dos lagunas evaluadas superaron los niveles de metales pesados considerados tóxicos en estos tejidos ($0.6 - 28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ MS}$, Krämer 2010), en especial las plantas colectadas en Churuca que acumularon en promedio $104.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ MS}$ (Tabla 10).

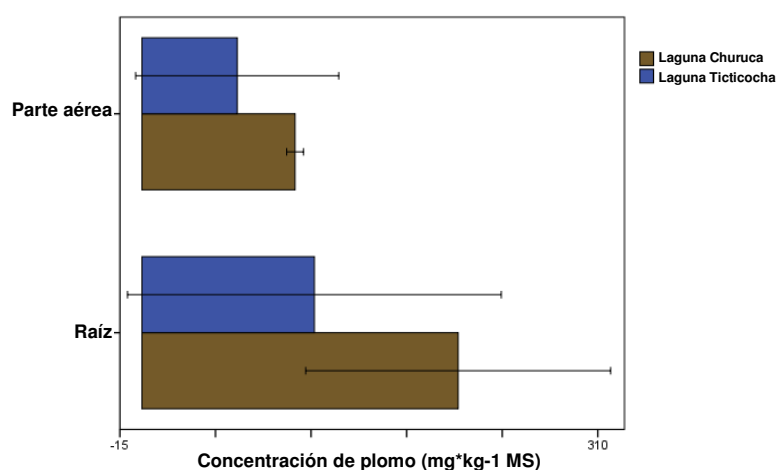


Figura 11 Valores promedio de las concentraciones de plomo en los tejidos de *Senecio rufescens* de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

•Las barras de error representan la desviación estándar. $n=3$.

5.4. Índices de valoración de tolerancia de *S. rufescens* a los metales pesados

5.4.1. Factor de bioconcentración (FBC)

Los valores de los FBC de las plantas de *S. rufescens* obtenidos para las dos lagunas indican que esta especie no acumula altas concentraciones de arsénico, cadmio, cobre o plomo en los tejidos de la parte aérea en relación con los que contienen los suelos rizosféricos asociados a ellas, dado que todos los FBC promedio fueron menores a la unidad, a excepción del FBC de cadmio obtenido en la laguna Ticticocha que obtuvo 1.41 de promedio (Tabla 13), a pesar de que en el primer punto de muestreo los niveles de cadmio en los tejidos vegetales no alcanzaron el límite de detección y por lo tanto en este punto no fue posible el cálculo del FBC para este metal.

Tabla 13 Factores de bioconcentración en los tejidos aéreos de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Ticticocha.

Réplica	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
P1	0.03	-	0.20	0.04
P2	0.04	1.46	0.26	0.11
P3	0.02	1.35	0.04	0.02
Media	0.03	1.41	0.17	0.06
Desviación estándar	0.01	0.08	0.11	0.05

Mientras que el índice para el cadmio calculado en la laguna Churuca es muy cercano a 1 y resultó casi el triple del resto de los FBC calculados (Tabla 14) y su valor más alto se registró en la tercera estación de muestreo (FBC=2.01). Por el contrario los FBC para plomo indica que este metal no fue absorbido por los tejidos aéreos de esta especie (FBC<1)

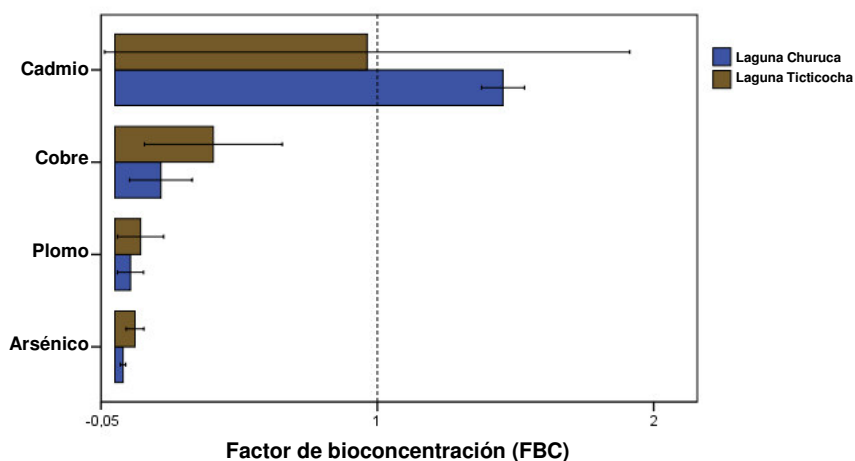


Figura 12 Factores de bioconcentración en los tejidos aéreos de *S. rufescens* de los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca.

Las barras de error representan la desviación estándar. n=3.

Los valores de los FBC obtenidos en la laguna Ticticocha y Churuca disminuyeron como sigue: Cd >> Cu > Pb > As, siendo el FBC del cadmio aproximadamente siete veces superior al resto de los índices calculados (Figura 12).

Tabla 14 Factores de bioconcentración en los tejidos aéreos de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Churuca

Réplica	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
P1	0.06	0.39	0.17	0.04
P2	0.05	0.34	0.26	0.05
P3	0.11	2.01	0.64	0.19
Media	0.07	0.91	0.36	0.09
Desviación estándar	0.03	0.95	0.25	0.08

5.4.2. Factor de traslocación (FT)

Los factores de traslocación obtenidos indican que las plantas de *Senecio rufescens* que crecen en las inmediaciones de la laguna Ticticocha y Churuca son eficientes en la traslocación de cadmio y cobre desde los tejidos radicales a los tejidos de la parte aérea (tallos y hojas), pues sus índices de traslocación fueron mayores a uno (Figura 13). En ambos casos, los datos obtenidos en la laguna Ticticocha no son homogéneos, sobre todo para cadmio, cuyo índice en el primer punto de muestreo fue tan bajo que no pudo ser determinado debido a que la concentración en los tejidos que no pudo ser detectado (Tabla 15).

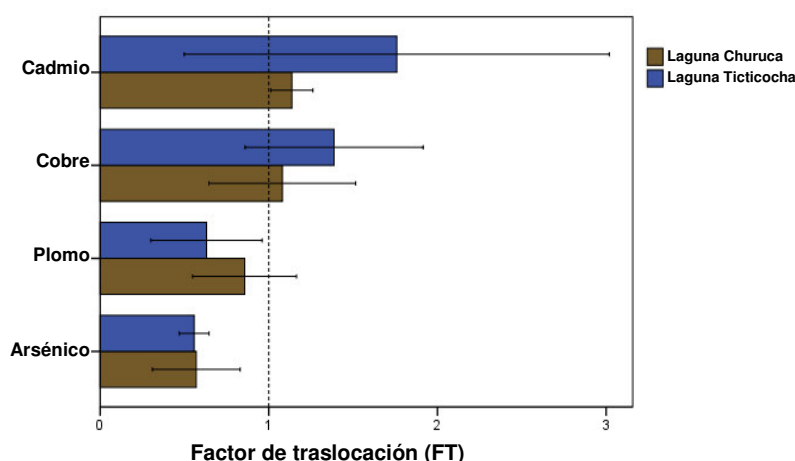


Figura 13 Factores de traslocación de los metales pesados analizados en los alrededores de la laguna Ticticocha y Churuca.

•Las barras de error representan la desviación estándar. n=3.

Asimismo, la laguna Ticticocha presentó los niveles promedio más altos de los FT, puesto que el cobre alcanzó FT= 1.39 y el cadmio FT=1.76 (Tabla 17).

El índice promedio más bajo fue el del plomo (0.56 para Ticticocha y 0.57 para Churuca), lo que indicaría que las plantas de *S. rufescens* acumulan elevadas cantidades de plomo en sus raíces pero no lo transfieren a los tejidos aéreos.

Tabla 15 Factores de traslocación de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Ticticocha

Réplica	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
P1	0.46	-	1.25	0.48
P2	0.42	0.87	0.94	0.55
P3	1.01	2.65	1.97	0.65
Media	0.63	1.76	1.39	0.56
Desviación estándar	0.33	1.26	0.53	0.09

Los factores de traslocación para cadmio obtenidos en las plantas de Churuca fueron mayores que la unidad en todas las estaciones de muestreo, mientras que el cobre presenta un bajo nivel solo en el primer punto de muestreo, de hecho los niveles más bajos de los FT fueron registrados en la primera estación de muestreo de dicha laguna (Tabla 18).

Tabla 16 Factores de traslocación de *Senecio rufescens* de los alrededores de la laguna Churuca

Réplica	Arsénico	Cadmio	Cobre	Plomo
P1	0.64	1.01	0.64	0.30
P2	0.72	1.14	1.51	0.59
P3	1.21	1.26	1.09	0.82
Media	0.86	1.14	1.08	0.57
Desviación estándar	0.31	0.13	0.44	0.26

6: DISCUSIÓN

6.1. Propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos

En las plantas, la biodisponibilidad de los metales pesados solubles se rige por los factores que controlan la actividad de las mismas en la solución del suelo (Wong, 2003) por tanto, para una correcta investigación de la acumulación de metales pesados en las especies vegetales se debe tener en cuenta las características físico-químicas del suelo a nivel local (Jiménez et al., 2011).

Los resultados indican que los suelos rizosféricos de las inmediaciones de las lagunas Ticticocha y Churuca no presentan diferencias significativas en ninguna de las propiedades químicas evaluadas ($p > 0.05$), a pesar de que se esperaban pronunciadas diferencias, especialmente en los niveles de pH y materia orgánica, pues debido al aspecto visiblemente más contaminado de la localidad de Churuca en comparación de Ticticocha se sospechó que sus suelos presentarían elevada acidez y poca cantidad de materia orgánica.

Los suelos rizosféricos de ambas localidades fueron moderadamente ácidos, de hecho sus niveles promedios de pH (6.1 para Churuca y 5.8 para Ticticocha) no están muy alejados de los valores recomendados para suelos de uso industrial y agrícola que indican el rango de 6 - 8 como valores idóneos para la protección de la salud ambiental y humana (CCME, 1999). Además este nivel de acidez disminuiría de manera moderada la disponibilidad de los metales pesados presentes en los suelos para ser absorbidos por las plantas (Park et al., 2011).

El escaso nivel de retención de metales pesados en los suelos rizosféricos de ambas localidades también se evidenciaría al observar los bajos valores promedios en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ($7.1 \text{ Cmol}(+) \cdot \text{Kg}^{-1}$ para Churuca y $9.6 \text{ Cmol}(+) \cdot \text{Kg}^{-1}$ para Ticticocha) con respecto a los valores referenciales (Garrido, 1994) e indicarían que los cationes que ocupaban los lugares de cambio no fueron

reemplazados por los metales pesados y por tanto estos no estarían disponibles para las plantas. Esto explicaría el poco nivel de sales solubles en las muestras de los suelos rizosféricos que mostraron valores promedio menores de 1 dS/m (0.17 y 0.2 dS/m en Ticticocha y Churuca, respectivamente) y que no alcanzaron los niveles de salinidad recomendados que establecen 2dS/m para suelos de uso agrícola y 4 dS/m para suelos de uso industrial (CCME, 1999).

Asimismo, la materia orgánica de los suelos rizosféricos de ambas localidades promoverían la formación de complejos estables con los metales en formas no disponibles para las plantas (Bradshaw, 1997), dado que presentaron porcentajes promedios clasificados como altos de acuerdo a las escalas de referencia (Fernández et al., 2006; Legaz y Primo-Millo, 1988), sin embargo este efecto sería leve al observar los valores de CIC de los suelos rizosféricos de Ticticocha y Churuca que fueron muy bajos, a pesar de que la materia orgánica es una rica fuente de cargas negativas y por lo tanto haría una contribución significativa al CIC del suelo (Hooda, 2010).

Por otro lado, los elevados porcentajes de arena registrados en los suelos cercanos a ambas lagunas (64.84 para Ticticocha y 64.96 para Churuca) de acuerdo a los resultados del análisis granulométrico son clasificados como franco-arenosos (SSDS, 1993) y presentaron menos de 10% de arcilla, lo que no favorecería la formación de agregados con los metales pesados y dificultaría el mantenimiento de altos niveles de materia orgánica (Bot y Benites, 2005), esto implica una leve amenaza para la contaminación de las aguas subterráneas debido a las cantidades de metales pesados que se pueden perder por lavado o lixiviación y por lo tanto no estarían disponibles para la absorción de las plantas.

6.2. Metales pesados en los suelos rizosféricos

Las concentraciones medias de metales totales ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de las inmediaciones de la laguna Ticticocha indican contaminación por todos los metales evaluados, dado que superan lo establecido por los Estándares de Calidad Ambiental

(ECAs) de suelo para uso agrícola en todas las estaciones (DS-002-2013-MINAM 2013), a pesar de que esta área presenta suelos que han sido poco afectados por actividades antropogénicas.

Se descartó que la contaminación de las aguas de la laguna Churuca afecten a la laguna Ticticocha e influyan en el contenido de metales registrado en los suelos rizosféricos puesto que los cuerpos de agua pertenecen a cuencas hidrográficas diferentes: la laguna Ticticocha pertenece a la cuenca del Rímac y la laguna Churuca a la cuenca Huascacocha, además los datos hidrogeológicos del área de estudio (Figura 3) indican que ambas lagunas se encuentran en unidades hidrogeológicas diferentes clasificadas como acuífero fisurado sedimentario (en la zona de Ticticocha) y acuitardo volcánico (en la zona de Churuca), esto indicaría que no existe comunicación entre sus aguas subterráneas y por consiguiente no es posible que la contaminación de las aguas de Churuca llegue a la laguna Ticticocha, a través del flujo de aguas subterráneas. Por otra parte, el análisis de la geología del área de la laguna Ticticocha (Figura 2) presenta depósitos minerales que naturalmente podrían ser fuentes de metales como el arsénico y el plomo, pero en cantidades bajas (Tumialán, 2003) por lo que no fue posible determinar el origen de las altas concentraciones registradas en los suelos de esta área y sería necesarias futuras investigaciones al respecto.

Al comparar la concentración de metales ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de la laguna Churuca con los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) de suelo para uso extractivo (DS-002-2013-MINAM 2013) se determinó contaminación por arsénico, cobre y plomo, sin embargo estos niveles son menores en comparación con otras zonas mineras del país (Bech, et al. 2012; Bech et al. 2015), por lo que las actividades realizadas en esta zona no aportarían niveles excesivos de contaminantes como se había previsto.

No se encontraron diferencias significativas en el contenido de metales entre lagunas, a pesar de que los valores registrados en los suelos rizosféricos de la laguna Churuca fueron mayores a los de la laguna Ticticocha (excepto en arsénico).

6.2.1. Arsénico

Los contenidos promedio de arsénico de los suelos rizosféricos de Ticticocha y Churuca (438.8 y 412 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente) resultaron siempre mayores a los valores comparativos para suelos normales, de uso agrícola y de uso industrial, evidenciando contaminación por arsénico a niveles que constituyen un riesgo significativo para la salud ambiental y humana en todos los puntos evaluados (CCME, 1999). Sin embargo se han registrado concentraciones de hasta 3007 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de arsénico total en suelos cercanos a zonas mineras de Cajamarca (Perú) y 65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ como concentración de referencia en suelos cercanos (Bech, et al. 2012), además en áreas contaminadas por pasivos mineros en Ancash, Perú se reportó un promedio de 5663 y 6000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de arsénico total en los suelos rizosféricos asociados a *Juncus articus* y *Cortaderia rudiusscula*, respectivamente (Medina y Montano, 2014).

El valor promedio de los suelos rizosféricos de Ticticocha resultó mayor al de las muestras de Churuca, a pesar de que se esperaba valores más altos en Churuca como resultado de las actividades extractivas realizadas. El contenido de arsénico en los suelos de Ticticocha estarían relacionados a la presencia de diferentes minerales como la arsenopirita (FeAsS), sulfuras como cinabarita (HgS) u otros minerales de azufre y arsénico, que producto de la meteorización paulatina y constante a nivel superficial acumularían arsénico en el suelo asociado a esta laguna (Tumialán, 2003).

Asimismo la concentración obtenida en Churuca probablemente esté relacionado a la textura ligeramente más gruesa de los suelos rizosféricos que no favorecen la presencia de cantidades sorbidas y totales de arsénico y que conllevarían al flujo de este metal a las aguas subterráneas (Fitz y Wenzel, 2002).

6.2.2. Cadmio

El cadmio se encuentra normalmente a bajas concentraciones en el suelo (Moreno et al., 2012) los valores normales y de referencia para suelos no contaminados establecen $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un máximo de $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011). Las concentraciones promedio de cadmio total en ambas localidades excedieron estos valores en al menos 5 veces más ($5.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en Ticticocha y $8.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Churuca).

Los suelos rizosféricos de Ticticocha podrían considerarse afectadas por cadmio y representaría un riesgo significativo para la salud de las personas y para el ambiente, de acuerdo a la legislación canadiense y los ECAs nacionales, establecidos para suelos de uso agrícola (CCME, 1999; DS-002-2013-MINAM, 2013). Mientras que ninguno de los puntos de muestreo de Churuca registró más de $22.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de cadmio en los suelos rizosféricos (determinado para suelos de uso industrial o extractivo) y por lo tanto no constituyen riesgo alguno para la salud de las personas y para el ambiente (CCME, 1999; DS-002-2013-MINAM, 2013; Figura 6).

Dado que los suelos contaminados con plomo suelen estar relacionados también a elevados contenidos de cadmio se esperó una mayor concentración de este metal en los suelos rizosféricos de Churuca ($1,679.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de plomo) con respecto al obtenido en Ticticocha ($1,115.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Por otra parte, se ha reportado un promedio 5 y $11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de cadmio total en los suelos rizosféricos asociados a *J. articus* y *C. rudiuscula*, respectivamente que se desarrollaron en áreas contaminadas por pasivos mineros en Ancash, Perú (Medina y Montano, 2014).

6.2.3. Cobre

Los suelos rizosféricos de las inmediaciones de la laguna Churuca presentaron concentraciones superiores a las registradas en Ticticocha (556.5 y $514.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente), sin embargo contrario a lo que se esperaba esta diferencia no es significativa a nivel estadísticos ($p > 0.05$). Los contenidos de cobre están estrechamente

asociados con la textura del suelo y suelen ser los más bajos en los suelos ligeramente arenosos (Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007), como es el caso de ambas localidades, por lo que se sospecha filtración de cantidades importantes de este metal a las capas inferiores del suelo.

Los límites de toxicidad que establecen $91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para la protección de la salud humana y ambiental y $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ como riesgo ecológico para las plantas (CCME, 1999; US EPA, 2007) fueron superados en todos los puntos de muestreo, por lo que se considera los suelos rizosféricos de ambas localidades presentan contaminación por este metal. Existen registros de concentraciones de cobre en suelo más elevadas en zonas cercanas a minas en Cajamarca-Perú, con máximos de $2070.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Bech et al., 2015), mientras que en los suelos rizosféricos asociados a *J. articus* y *C. rudiuscula*, se reportaron 65 y $177 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de cobre total, a pesar de ser colectadas en áreas contaminadas por pasivos mineros en Ancash, Perú (Medina y Montano, 2014).

6.2.4. Plomo

Tal como se esperaba, el contenido promedio de plomo de los suelos rizosféricos de la laguna Churuca fue considerablemente mayor al obtenido en la laguna Ticticocha (Figura 9), sin embargo esta diferencia no fue significativa a nivel estadístico ($p > 0.05$).

Al comparar la concentración de plomo en los suelos rizosféricos de la laguna Churuca ($1,679.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) con la normativa nacional vigente (DS-002-2013-MINAM, 2013) se observó que excedieron los valores recomendados en aproximadamente $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, para suelos de uso extractivo, sin embargo no fue tan alto como los valores reportados en otras zonas mineras del Perú que alcanzan $5187 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Bech et al., 2012). De la misma forma, los suelos rizosféricos de la laguna Ticticocha presentaron altos niveles de plomo al compararlos con los recomendados por los ECAs de suelo de uso agrícola ($1,115.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; DS-002-2013-MINAM, 2013), por lo tanto los suelos rizosféricos alrededor de ambas lagunas se considerarían contaminados por plomo.

Ambas zonas estarían relacionadas a procesos geogénicos derivados de materiales plutónicos que por lo general contienen minerales fuentes de plomo como galena (PbS), cerusita (PbCO₃) y anglesita (PbSO₄) y que incrementarían este metal en los suelos rizosféricos especialmente si hay exposición y acumulación de dichos materiales debido a la actividad minera, como es el caso de la zona que rodea a la laguna Churuca.

Además, en ambos casos se sobrepasaron los niveles de referencia para suelos no contaminados del mundo (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011) e incluso presentan contenidos superiores a 120 mg·kg⁻¹ que representan un riesgo ecológico inaceptable para las plantas (US EPA 2005c) y a 500 mg·kg⁻¹ considerada como concentración excesiva y que produce efectos tóxicos en las plantas (Adriano, 2001).

6.3. Acumulación de metales pesados en plantas de *Senecio rufescens*

Si bien los factores del suelo tienen un gran impacto en la biodisponibilidad de los metales para las plantas, diferentes especies o variedades cultivadas en el mismo suelo pueden absorber diferentes metales y en distintas cantidades (Miles y Parker, 1979), esto significa que la absorción de elementos en plantas es selectiva y depende de la especie (Cheng, 2003). Por esta razón es importante el desarrollo de conocimiento acerca de las habilidades de diferentes especies para absorber y transportar elementos bajo condiciones naturales y evaluar si podría ser empleada en estrategias de remediación de suelos contaminados con metales pesados.

Senecio rufescens no muestra altas concentraciones en la parte aérea que podrían clasificarla como hiperacumuladora de cadmio, cobre, arsénico o plomo basado en el criterio de considerar como tales a aquellas que acumulan más de 100 mg·kg⁻¹ MS de Cd, 300 mg·kg⁻¹ MS de Cu o 1000 mg·kg⁻¹ MS de As y Pb creciendo en sus hábitats naturales (van der Ent et al., 2013). Sin embargo esto no cambia su potencial uso en fitorremediación, dado que puede acumular concentraciones importantes de plomo y arsénico en sus tejidos radicales y podría ser empleada en fitoestabilización, tal como indican los resultados.

6.3.1. Arsénico

De todos los metales considerados en este estudio, el arsénico es, por mucho, el más peligroso. Debido a su efecto halo puede causar efectos adversos para la salud humana, de los animales y de las plantas lejos de la fuente inicial de emisión (Alloway 2013) Por lo tanto, la reducción de las concentraciones de arsénico en suelos contaminados debería ser un objetivo primordial de las tecnologías de fitorremediación.

Las plantas de *S. rufescens* que crecieron en la localidad de Churuca registraron mayor acumulación de arsénico en sus tejidos vegetales, especialmente en la parte aérea, con respecto a los que crecieron en Ticticocha, a pesar de que los suelos rizosféricos visiblemente más contaminados de la localidad de Churuca mostraron valores ligeramente más bajos que los de Ticticocha (412 y 438.8 mg·kg⁻¹MS), esto indicaría que las actividades de Churuca influirían en la biodisponibilidad de arsénico pues aunque su concentración no sea tan alta permitiría una mayor absorción de este metal en las plantas. Puesto que los contenidos de materia orgánica y arcillas entre los suelos de ambas lagunas son similares entre sí, podríamos suponer que esta diferencia en la disponibilidad estaría relacionada a los niveles de fosfato en el suelo que a elevadas cantidades reduce su absorción para las plantas (Patra et al. 2004) y por lo tanto sería mayor en Ticticocha que en Churuca, sin embargo no hay datos suficientes para evaluar esa probabilidad.

Mientras que el contenido normal de arsénico en los tejidos vegetales va de menos 1 mg·kg⁻¹ a 10 mg·kg⁻¹ (Moreno et al., 2012), *S. rufescens* alcanzó un promedio de 11.41 mg·kg⁻¹MS en sus tallos y hojas en Ticticocha y 27.24 mg·kg⁻¹MS en Churuca. Estos valores son muy bajos al compararlos con los de *Senecio* sp, evaluado en Cajamarca, Perú, donde se obtuvo 50 y 109 mg·kg⁻¹ MS en los tejidos aéreos de los que crecen en una zona minera y en una zona referencial, respectivamente (Durán Cuevas, 2010) y con los de *Senecio salignus* que registró 150.9 mg·kg⁻¹ MS en suelos cercanos a presas de relave en Chihuahua, México (Lerma Reyes, 2006). Mientras que *Senecio*

brasiliensis reportó solo 0.06 mg·kg⁻¹ MS de arsénico en su parte aérea en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015)

Otros géneros han registrado valores superiores en los tejidos de la parte aérea, como *Trifolium repens* que reportó 77.4 mg·kg⁻¹ MS, *Achyrocline alata* 125.5 mg·kg⁻¹ MS, *Taraxacum officinale* 137.5 mg·kg⁻¹ MS, *Baccharis latifolia* 138 mg·kg⁻¹ MS, *Plantago orbignyana* 196 mg·kg⁻¹ MS, *Sonchus oleraceus* 227 mg·kg⁻¹ MS, *Ageratina* sp 286.5 mg·kg⁻¹ MS y *Lepidium bipinnatifidum* 325 mg·kg⁻¹ MS todas en zonas mineras de Perú (Bech, et al., 2012; Bech et al., 2015).

Por otro lado, los valores promedio obtenidos en los tejidos radicales de *Senecio rufescens* fueron 16.98 mg·kg⁻¹ MS en las inmediaciones de Ticticocha y 32.84 mg·kg⁻¹ MS en Churuca. En ambos casos se supera a la concentración en las raíces de *Senecio brasiliensis* que registró solo 0.09 mg·kg⁻¹ MS en su parte aérea en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015). Mientras que, *Senecio* sp registró 117 mg·kg⁻¹ MS, en los mismos tejidos en una zona libre de actividades antropogénicas (Bech et al., 2012) y *Senecio salignus* registró 65.9 mg·kg⁻¹ MS en suelos cercanos a presas de relave en Chihuahua, México (Lerma Reyes, 2006). Además otras especies analizadas en zonas mineras de Perú presentaron concentraciones mayores en las raíces, tales como *Sonchus oleraceus* que reportó 61 mg·kg⁻¹ MS, *Achyrocline alata* 74.2 mg·kg⁻¹ MS, *Trifolium repens* 87.5 mg·kg⁻¹ MS, *Ageratina* sp 200 mg·kg⁻¹ MS y *Taraxacum officinale* 246.1 mg·kg⁻¹ MS (Bech, et al., 2012; Bech et al., 2015).

Se sabe que el 90% del total de arsénico acumulado en las plantas se almacena en las raíces y pocas plantas tienen la capacidad de traslocar grandes cantidades de arsénico desde la raíz hasta la parte aérea (Rahman y Hasegawa, 2011), lo cual concuerda con los resultados obtenidos para *S. rufescens* en ambas lagunas, puesto que presenta mayor concentración en la raíz que en los tallos y hojas, sin embargo esta diferencia no resultó significativa a nivel estadístico para las plantas de ambas lagunas

6.3.2. Cadmio

El contenido de cadmio en los tejidos aéreos (tallos y hojas) de *Senecio rufescens* se encuentran dentro del rango 5 - 30 mg·kg⁻¹ considerados como excesivos o tóxicos para las plantas (Kabata-Pendias, 2011) pero sin evidenciar ningún síntoma de fitotoxicidad, a pesar de que la absorción de cadmio en tejidos vegetales es muy rápida y fitotóxica (Kabata-Pendias, 2011).

Las plantas colectadas en los alrededores de Ticticocha en promedio acumularon más cadmio en los tejidos aéreos que las de los alrededores de Churuca (8.9 y 5.4 mg·kg⁻¹, respectivamente), sin embargo esta diferencia no resultó estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

Las concentraciones obtenidas en este estudio resultaron mayores a lo que se registró para *Senecio brasiliensis*, que acumuló solo 1.17 mg·kg⁻¹ MS en la parte aérea en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015). Al compararlos con otras especies de *Senecio*, los valores obtenidos para *S. rufescens* fueron inferiores, ya que *Senecio vulgaris* registró 19.6 mg·kg⁻¹ MS en los alrededores de una mina abandonada en Turquía, en los mismos tejidos (Baycu et al., 2014), mientras que *Senecio salignus* reportó 20.22 mg·kg⁻¹ MS en suelos cercanos a presas de relave en Chihuahua, México (Lerma Reyes, 2006).

Al igual que el contenido de cadmio en tallos y hojas, los tejidos radicales de *Senecio rufescens* presentan mayor concentración en los alrededores de Ticticocha, en comparación con los de Churuca (8.9 y 5.4 mg·kg⁻¹, respectivamente). Un resultado similar se observó en *Senecio salignus*, que registró un promedio de 5.23 mg·kg⁻¹ MS en suelos cercanos a presas de relave en Chihuahua, México (Lerma Reyes, 2006). *Senecio brasiliensis* acumuló solo 0.54 mg·kg⁻¹ MS en los mismos tejidos en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015).

Además, las concentraciones registradas superan hasta por ocho veces la concentración normal de cadmio en plantas terrestres que crecen en suelos no contaminados y que están en el rango de 0.2 – 0.8 mg·kg⁻¹ (Hobday, 2003).

6.3.3. Cobre

El cobre es esencial para el crecimiento de las plantas, pero causa efectos tóxicos cuando los tejidos aéreos acumulan niveles superiores a 20 mg·kg⁻¹ MS (Borkert, Cox y Tucker, 1998), o cuando se encuentran en el rango de 20 – 100 mg·kg⁻¹ MS (Kabata-Pendias, 2011).

Los resultados indican que las plantas de *Senecio rufescens* que crecen en los alrededores de Ticticocha y Churuca superan el rango referencial, con un promedio de 44.9 mg·kg⁻¹ y 156.6 mg·kg⁻¹ MS en los tallos y hojas (parte aérea) respectivamente y ambas poblaciones no presentan ningún tipo de deficiencia visible, a pesar de que el estrés oxidativo inducido por cobre provoca clorosis, necrosis e inhibición del crecimiento (Bes et al. 2009).

Resultados similares se obtuvieron para *Senecio* sp de los alrededores de una zona minera y de una zona referencial en Cajamarca, Perú donde se registraron 227 y 20 mg·kg⁻¹ MS, respectivamente (Bech et al., 2012). Además, *Senecio brasiliensis* acumuló solo 10.4 mg·kg⁻¹ MS en la parte aérea en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015) y *Senecio vulgaris* acumuló 184 mg·kg⁻¹ MS en los alrededores de una mina abandonada en Turquía, en los mismos tejidos (Baycu et al., 2014). Especies de las inmediaciones de una minera en Cajamarca, Perú presentaron contenidos superiores de cobre en sus tejidos aéreos: *Taraxacum officinale* registró 122.9 mg·kg⁻¹ MS, *Achyrocline alata* 130 mg·kg⁻¹ MS, *Trifolium repens* 198 mg·kg⁻¹ MS y *Ageratina* sp 353.6 mg·kg⁻¹ MS (Bech et al., 2015).

En relación al contenido de cobre en los tejidos radicales, *Senecio rufescens* de las inmediaciones de Churuca reportó un promedio de 154.8 mg·kg⁻¹ MS y los de Ticticocha

35.2 mg·kg⁻¹ MS. Asimismo, *Senecio* sp registró 51 y 47 mg·kg⁻¹ MS, en los mismos tejidos en los alrededores de una zona minera y de una zona referencial, respectivamente (Bech et al., 2012) y *Senecio brasiliensis* acumuló 16.3 mg·kg⁻¹ MS en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015). Mientras que *Trifolium repens* reportó 87.5 mg·kg⁻¹ MS, *Achyrocline alata* 126.8 mg·kg⁻¹ MS, *Taraxacum officinale* 214.9 mg·kg⁻¹ MS y *Ageratina* sp 395.5 mg·kg⁻¹ MS todas crecieron naturalmente en zonas aledañas a una zona minera en Cajamarca, Perú (Bech et al., 2015).

No es posible determinar si la parte aérea o la raíz acumulan mayor cantidad puesto que los valores son muy similares entre sí, para las plantas de *S. rufescens* de ambas lagunas (Figura). Sin embargo, es evidente que las plantas colectadas en Churuca acumularon casi el triple de cobre que las plantas colectadas en Ticticocha, tanto en la raíz, como en los tallos y hojas (Figura 10). Esta diferencia está relacionada con la baja disponibilidad de cobre en los suelos rizosféricos cercanos a Ticticocha, que podría estar influenciada por una serie de factores del suelo que no fueron evaluadas en este estudio, dado que no se observan diferencias significativas entre las propiedades edáficas previamente seleccionadas (Figura 4, Tabla 5).

Entre estos factores se distingue la cantidad de micronutrientes, la fijación microbiana, el contenido de ácidos húmicos, que inmoviliza fuertemente al cobre en su forma Cu²⁺, o el contenido de hidróxidos de aluminio y hierro, carbonatos y fosfatos, que tienen afinidad para la formación de complejos orgánicos con para formar compuestos no disponibles para las plantas, entre otros (Hooda, 2010; Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007).

6.3.4. Plomo

Los valores de acumulación de plomo en las raíces y tejidos aéreos de *S. rufescens* colectadas en Churuca fueron superiores a los obtenidos en Ticticocha, pero no se encontraron diferencias significativas entre estas ($p < 0.05$).

Los síntomas visibles de exceso de plomo en las plantas son raíces cortas y marrones, hojas verdes y oscuras y marchitez de las hojas más viejas (Kabata-Pendias y B. Mukherjee, 2007). Sin embargo *S. rufescens* no mostró estos síntomas al ser colectada, a pesar de que el valor registrado en los tejidos aéreos de plantas de Ticticocha y Churuca (64.8 y 104.1 mg·kg⁻¹, respectivamente) superan por mucho el rango de 2 – 6 mg·kg⁻¹ considerado como normal y en el que las plantas no presentan problemas de toxicidad (Kabata-Pendias, 2011).

Por lo general, las plantas acumulan la mayoría de plomo en las raíces y solo una pequeña fracción es traslocada a la parte aérea (Patra et al., 2004), lo que coincide con los resultados obtenidos en este estudio para las plantas colectadas en ambas lagunas.

La cantidad de plomo total en las raíces de *S. rufescens* alcanza un promedio de 117.3 mg·kg⁻¹ en Churuca y 215.0 mg·kg⁻¹ en Ticticocha. Estudios previos han reportado concentraciones promedio mayores en los mismos tejidos, con 451 y 381.3 mg·kg⁻¹ MS de *Senecio* sp de los alrededores de una zona minera y de una zona referencial en Cajamarca, Perú, respectivamente (Bech et al., 2012). Valores más bajos fueron registrados para *Senecio brasiliensis*, con 93.8 mg·kg⁻¹ MS de plomo en raíces en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro (Boechat et al., 2015), mientras que *Senecio salignus* registró 48 mg·kg⁻¹ MS en suelos cercanos a presas de relave en Chihuahua, México (Lerma Reyes, 2006).

Asimismo la acumulación de plomo en las raíces de plantas de géneros diferentes ha registrado valores entre 800 y 900 mg·kg⁻¹ MS para *Sonchus oleraceus* y *Baccharis latifolia* (Bech et al., 2012)., 1319 y 3978 mg·kg⁻¹ MS para *Achyrocline alata* y *Ageratina* sp, respectivamente (Bech et al., 2015) y más de 2000 mg·kg⁻¹ MS para *Plantago orbignyana* (Bech et al., 2012) y *Taraxacum officinale* (Bech et al., 2015), todas en zonas mineras de Perú.

Por otra parte, la acumulación de plomo en los tallos y hojas (parte aérea) de *Senecio rufescens* obtuvo un promedio de 64.8 mg·kg⁻¹ en Ticticocha y 104.1 mg·kg⁻¹ en Churuca, valores muy bajos en comparación con los registrados por *Senecio* sp, que fueron 146.9 y 4253 mg·kg⁻¹ MS, alrededores de una zona minera y de una zona referencial en Cajamarca, Perú, respectivamente (Bech et al., 2012).

Con respecto a otras especies del mismo género, se ha reportado 144.6 mg·kg⁻¹ MS en plantas de *Senecio salignus* de las inmediaciones de una presa de relave en Chihuahua, México (Lerma Reyes, 2006), mientras que *Senecio brasiliensis* acumuló 72.3 mg·kg⁻¹ MS en suelos contaminados en áreas de procesamiento de oro en Brasil (Boechat et al., 2015).

Otros géneros han registrado valores superiores en los tejidos de la parte aérea, como 1650.3 mg·kg⁻¹ MS para *Achyrocline alata*, más de 2000 mg·kg⁻¹ MS para *Sonchus oleraceus*, *Baccharis latifolia* (Bech et al., 2012) y *Taraxacum officinale* (Bech et al., 2015), 5045.3 mg·kg⁻¹ MS para *Ageratina* sp (Bech et al., 2015), y más de 6000 mg·kg⁻¹ MS para *Plantago orbignyana* y *Lepidium bipinnatifidum* (Bech et al., 2012), todas en zonas mineras de Perú.

6.4. Índices de valoración de tolerancia de *S. rufescens* a los metales pesados

Las plantas de *Senecio rufescens* mostraron bajos valores en los factores de bioacumulación (FBC<1) y de traslocación de arsénico a la parte aérea (FT<1) en comparación con los otros metales evaluados para ambas lagunas. Esto indicaría que el mecanismo empleado por esta especie para tolerar las altas concentraciones de arsénico sería la exclusión, restringiendo su acumulación a los tejidos de la raíz (Baker, 1981), lo que coincide con investigaciones que indican que la resistencia a arsénico se basa en la exclusión de la absorción o en la restricción de la traslocación a sus partes aéreas (Wang, Cui y Dong, 2002).

Por otra lado, las plantas de *S. rufescens* de ambas localidades registraron concentraciones mayores de cadmio en los tejidos aéreos que en los radicales ($FT > 1$) evidenciando aparente movilidad de este metal dentro de la planta. Asimismo, el factor de bioconcentración promedio en Ticticocha fue mayor que 1, probablemente debido a la poca cantidad de réplicas consideradas, mientras que en Churuca el FBC fue menor a la unidad, no obstante los valores de los FBC de metales que no presentan niveles de contaminación (Figura 5) poseen una menor trascendencia (Diez, 2008). Esto indica que si bien *S. rufescens* podría ser una especie acumuladora es necesario una mayor cantidad de réplicas para establecer relaciones de concentración más claras, por lo tanto no se propone una estrategia de tolerancia de cadmio para esta especie.

Los resultados indican que los factores de bioconcentración promedio (FBC) para cobre en ambas localidades son menores que la unidad, lo que significa que *S. rufescens* no es muy efectiva para absorber el cobre del suelo, a pesar de que la concentración de este metal en el suelo es muy alta (Figura 5). Sin embargo la fracción de este metal que llega a la raíz se moviliza efectivamente hasta la parte aérea ($FT > 1$), esto se ve reflejado en la acumulación más elevada de cobre en los tejidos aéreos de *S. rufescens* con respecto al de sus raíces. Es probable que el mejoramiento de la absorción de cobre del suelo a los tejidos vegetales (mediante métodos para incrementar la biodisponibilidad de este metal, por ejemplo) podría convertir a *S. rufescens* en una candidata apropiada para la fitoextracción, lo cual es particularmente interesante al considerar que los mecanismos de resistencia al cobre en la mayoría de las plantas se basan principalmente en estrategias de exclusión (Deng, Ye y Wong, 2004).

Con respecto a la tolerancia al plomo, cabe destacar que todos los puntos evaluados presentan grandes cantidades de este metal en los suelos rizosféricos (Figura 5), sin embargo el factor de bioconcentración indica que *S. rufescens* no acumula este metal en sus tejidos aéreos ($FBC < 1$), por lo que su uso en las tecnologías de fitoextracción de plomo no sería recomendable. Además, las elevadas concentraciones de plomo en los

tejidos radicales y la baja translocación a los tejidos aéreos ($FT < 1$) sugeriría que las plantas de *S. rufescens* desarrollaron tolerancia a plomo mediante estrategias de exclusión, inmovilizando concentraciones importantes de plomo a nivel de las raíces.

De los resultados de este estudio se desprende que *S. rufescens* se comporta como una especie exclusora de arsénico y cadmio, en un medio de elevadas concentraciones de estos metales en los suelos y podría ser empleada en procesos de fitoestabilización de suelos contaminados en las zonas evaluadas. Teniendo en cuenta que la revegetación de lugares contaminados se considera una de las técnicas más sostenibles para conseguir una estabilización de los suelos a largo plazo (Diez, 2008), *S. rufescens* representa una especie promisoría para este propósito, considerando además que es una especie de amplia distribución (Beltrán y Roque, 2015) y tolerante a altas concentraciones de arsénico, cobre y plomo en los suelos.

7: CONCLUSIONES

1. Las concentraciones medias de metales totales ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de las inmediaciones de la laguna Churuca son 412.0 para arsénico, 8.6 para cadmio, 556.5 para cobre y 1679.1 para plomo. Estos valores superan los estándares nacionales recomendados para suelos de uso industrial y/o extractivo para arsénico, cobre y plomo e indican contaminación por esos metales.
2. Las concentraciones medias de metales totales ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de las inmediaciones de la laguna Ticticocha son 438.8 para arsénico, 5.8 para cadmio, 514.3 para cobre y 1115.7 para plomo. Estos valores superan los estándares nacionales recomendados para suelos de uso agrícola e indican contaminación por todos los metales evaluados, además estas concentraciones no presentan diferencias significativas con los valores obtenidos para laguna Churuca.
3. La comparación de las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos de las inmediaciones entre las lagunas evaluadas indican que no hay diferencias significativas entre ellas. Ambas presentan suelos moderadamente ácidos (pH entre 4.8 y 6.0), con elevada cantidad de materia orgánica (rango de variación de 2 a 10%), sin problemas de salinidad (<2 dS/m) y con escasa capacidad de retención de cationes (rango de variación de 4.9 – 16.3 cmol (+)/Kg). La textura para ambas es clasificada como franco arenosa.
4. *Senecio rufescens* presenta concentraciones relativamente altas de arsénico (22.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS en Ticticocha y 32.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS en Churuca) y de plomo (104.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS en Ticticocha y 215.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS en Churuca), a nivel de raíces.
5. Tanto los factores de bioconcentración (FBC) como los factores de traslocación (FT) para arsénico y plomo son menores a 1, por lo tanto se propone a *S. rufescens* como una especie exclusora de arsénico y plomo y se recomienda para estudios de fitoestabilización de suelos contaminados en la zona de estudio.
6. No se propone una estrategia de tolerancia de cadmio para *Senecio rufescens* puesto que a pesar de registrar mayor concentración de cadmio en su parte aérea

en comparación de su raíz ($FT > 1$), los factores de bioconcentración no establecen relaciones concluyentes.

7. *Senecio rufescens* acumula bajas concentraciones de cobre ($44.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS en Ticticocha y $156.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ MS en Churuca) en sus tejidos aéreos (tallos y hojas), en relación con el contenido de este metal en el suelo ($FBC < 1$). Sin embargo presenta $FT > 1$, por lo tanto se propone que *S. rufescens* podría comportarse como especie acumuladora de cobre si se mejora la biodisponibilidad de este metal para las plantas.
8. *Senecio rufescens* es capaz de sobrevivir en suelos contaminados con diversos metales pesados, por lo que se propone como candidata en estudios acerca de estrategias de revegetación de zonas andinas, especialmente apropiada para mitigar o minimizar los riesgos ambientales del plomo y arsénico en los suelos.

8: RECOMENDACIONES

No se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones medias de metales totales ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos rizosféricos de las inmediaciones de la laguna Ticticocha y Churuca, lo que indica contaminación en ambas localidades en arsénico, cobre y plomo, a pesar de que en la laguna Ticticocha no se realiza ninguna actividad antropogénica cercana. Esto indica la necesidad de investigar posibles procesos de contaminación en las zonas aledañas a la laguna Ticticocha.

No fue posible definir relaciones entre el contenido de metales totales del suelo rizosférico y sus parámetros físico-químicos respectivos para conocer cuáles influirían en la biodisponibilidad de los metales pesados para las plantas, por lo que se recomienda considerar factores edáficos adicionales en estudios con fines similares, tales como potencial redox, contenido de nutrientes (C y N), entre otros. Asimismo, es importante considerar la actividad microbiana ligada al suelo cuando se selecciona la especie a evaluar dado que pueden afectar la absorción de metales pesados y su translocación a la parte aérea de la planta.

Los resultados indican que *Senecio rufescens* es una especie adaptada a suelos con alto contenido de metales, sin embargo no existen estudios acerca de su fenología y formas de propagación por lo que se sugieren futuras investigaciones al respecto.

La propuesta de emplear a *Senecio rufescens* en estrategias de fitoestabilización de suelos contaminados con arsénico y plomo requieren una mejor comprensión de la habilidad de esta especie. Se recomienda realizar experimentos previos a varios niveles de los factores implicados, desde cultivos en hidroponía y/o invernadero hasta ensayos de campo a condiciones naturales.

9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADESODUN, J.K., ATAYESE, M.O., AGBAJE, T.A., OSADIAYE, B.A., MAFE, O.F. y SORETIRE, A.A., 2009. Phytoremediation Potentials of Sunflowers (*Tithonia diversifolia* and *Helianthus annuus*) for Metals in Soils Contaminated with Zinc and Lead Nitrates. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 207, no. 1–4, pp. 195–201. ISSN 0049-6979. DOI 10.1007/s11270-009-0128-3.
- ADHIKARI, T., KUMAR, A., SINGH, M. V. y RAO, A.S., 2010. Phytoaccumulation of Lead by Selected Wetland Plant Species. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 41, no. 22, pp. 2623–2632. ISSN 0010-3624. DOI 10.1080/00103624.2010.517879.
- ADRIANO, D.C., 2001. Lead. *Trace Elements in Terrestrial Environments*. New York, NY: Springer New York, pp. 349–410.
- ALIAGA ZEGARRA, E.D., PALOMINO CADENAS, E.J., YUPANQUI TORRES, E., SALVADOR POMA, M.L., BOBADILLA ALVAREZ, M.C., HILDEN ACUÑA, F. y LÓPEZ LUCIO, M.N., 2009. Capacidad de las plantas nativas en ambientes con drenaje ácido para la bioacumulación de metales pesados. En: Importante porque habla de humedales!, *Aporte Santiaguino*, vol. 2, no. 1, pp. 9–20.
- ALLOWAY, B.J. (ed.), 2013. *Heavy Metals in Soils*. Third Edit. Dordrecht: Springer Netherlands. Environmental Pollution. ISBN 978-94-007-4469-1.
- ARGOTA PÉREZ, G., ENCINA CÁCERES, M., ARGOTA COELLO, H. y IANNACONE O., J., 2014. Coeficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando *Alopecurus magellanicus* var. *bracteatus* y *Muhlenbergia angustata* (Poaceae), Puno, Perú. *The Biologist*, vol. 12, no. 1, pp. 99–108. DOI ISSN 1994-9073.
- AZEVEDO SILVEIRA, M.L., FERRACCIÚ ALLEONI, L.R. y GUIMARÃES GUILHERME, L.R., 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, vol. 60, no. 4, pp. 793–806. ISSN 0103-9016. DOI 10.1590/S0103-90162003000400029.
- BAKER, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 3, no. 1–4, pp. 643–654. DOI 10.1080/01904168109362867.
- BAKER, A.J.M. y BROOKS, R.R., 1989. *Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry*. S.I.: BIORECOVERY.
- BAKER, A.J.M. y WHITING, S.N., 2002. In search of the Holy Grail - a further step in understanding metal hyperaccumulation? *New Phytologist*, vol. 155, no. 1, pp. 1–4. ISSN 0028-646X. DOI 10.1046/j.1469-8137.2002.00449_1.x.
- BAYCU, G., TOLUNAY, D., OZDEN, H., CSATARI, I., KARADAG, S., AGBA, T. y ROGNES, S.E., 2014. An abandoned copper mining site in Cyprus and assessment of metal concentrations in plants and soil. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 17, no. September, pp. 0. ISSN 1522-6514. DOI 10.1080/15226514.2014.922929.
- BECH, J., DURÁN CUEVAS, P.A., ROCA, N., POMA, W., SÁNCHEZ, I., BARCELÓ, J., BOLUDA, R., ROCA PÉREZ, L. y POSCHENRIEDER, C., 2012. Shoot accumulation of several trace elements in native plant species from contaminated soils in the Peruvian Andes. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 113, pp. 106–111. ISSN 03756742. DOI 10.1016/j.gexplo.2011.04.007.
- BECH, J., DURÁN CUEVAS, P.A., ROCA, N., POMA, W., SÁNCHEZ, I., ROCA PÉREZ,

- L., BOLUDA, R., BARCELÓ, J. y POSCHENRIEDER, C., 2012. Accumulation of Pb and Zn in *Bidens triplinervia* and *Senecio* sp. spontaneous species from mine spoils in Peru and their potential use in phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 123, no. 123, pp. 109–113. ISSN 03756742. DOI 10.1016/j.gexplo.2012.06.021.
- BECH, J., POSCHENRIEDER, C., LLUGANY, M., BARCELÓ, J., TUME, P., TOBIAS, F.J., BARRANZUELA, J.L. y VÁSQUEZ, E.R., 1997. Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru. *Science of The Total Environment*, vol. 203, no. 1, pp. 83–91. ISSN 00489697. DOI 10.1016/S0048-9697(97)00136-8.
- BECH, J., ROCA, N., TUME, P., RAMOS MIRAS, J., GIL, C. y BOLUDA, R., 2015. Screening for new accumulator plants in potential hazardous elements polluted soil surrounding Peruvian mine tailings. *Catena*, ISSN 03418162. DOI 10.1016/j.catena.2015.07.009.
- BELTRÁN, H., GRANDA, A., LEÓN, B., SAGÁSTEGUI, A., SÁNCHEZ, I. y ZAPATA, M., 2013. Asteraceae endémicas del Perú. *Revista Peruana de Biología*, vol. 13, no. 2, pp. 64–164s. ISSN 1727-9933. DOI 10.15381/rpb.v13i2.1807.
- BELTRÁN, H. y ROQUE GAMARRA, J., 2015. El género *Senecio* L. (Asteraceae-Senecioneae) en el departamento de Lima, Perú. *Arnaldoa*, vol. 22, no. 2, pp. 395–412. DOI 10.22497/208.
- BES, C.M., MENCH, M., AULEN, M., GASTE, H. y TABERLY, J., 2009. Spatial variation of plant communities and shoot Cu concentrations of plant species at a timber treatment site. *Plant and Soil*, vol. 330, no. 1–2, pp. 267–280. ISSN 0032-079X. DOI 10.1007/s11104-009-0198-4.
- BOBADILLA ALVAREZ, M.C., ALIAGA ZEGARRA, E.D., YUPANQUI TORRES, E. y EDWIN, P., 2013. A phytoremediation approach using *Calamagrostis ligulata* and *Juncus imbricatus* in Andean wetlands of Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 185, no. 1, pp. 323–334. ISSN 01676369. DOI 10.1007/s10661-012-2552-x.
- BOECHAT, C.L., PISTÓIA, V.C., GIANELO, C. y CAMARGO, F.A. de O., 2015. Accumulation and translocation of heavy metal by spontaneous plants growing on multi-metal-contaminated site in the Southeast of Rio Grande do Sul state, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research International*, ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/s11356-015-5342-5.
- BORGHEI, S.M., ARJMANDI, R. y MOOGOUEI, R., 2014. Bioaccumulation of Radionuclide Metals in Plants: A Case Study of Cesium. En: D.K. GUPTA y C. WALTHER (eds.), *Radionuclide Contamination and Remediation Through Plants*. 1. Cham: Springer International Publishing, pp. 177–195. ISBN 978-3-319-07664-5.
- BORKERT, C.M., COX, F.R. y TUCKER, M.R., 1998. Zinc and copper toxicity in peanut, soybean, rice, and corn in soil mixtures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 29, no. 19–20, pp. 2991–3005. ISSN 0010-3624. DOI 10.1080/00103629809370171.
- BOT, A. y BENITES, J., 2005. *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-105366-9.
- BRACK, A., 1986. Ecología de un país complejo. En: MANFER-MEJÍA BACA (ed.), *La gran geografía del Perú: naturaleza y hombre*. Volumen II. Barcelona, España: s.n.,

pp. 145–319.

- BRADSHAW, A., 1997. Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecological Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 255–269. ISSN 09258574. DOI 10.1016/S0925-8574(97)00022-0.
- CABRERA, A.L., 1985. El genero Senecio (Compositae) en Bolivia. *Darwiniana*, vol. 26, no. 1–4, pp. 79–217.
- CCME, C.C. of M. of the E. and H.H., 1999. *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*. 1999. Canadá: s.n.
- CHENG, S., 2003. Heavy metals in plants and phytoremediation. *Environmental science and pollution research international*, vol. 10, no. 5, pp. 335–40. ISSN 0944-1344.
- CHIBUIKE, G.U. y OBIORA, S.C., 2014. Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*, ISSN 16877675. DOI 10.1155/2014/752708.
- CONESA, H.M., FAZ, A. y ARNALDOS, R., 2006. Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (SE Spain). *The Science of the total environment*, vol. 366, no. 1, pp. 1–11. ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2005.12.008.
- DAMMERT LIRA, A. y MOLINELLI ARISTONDO, F., 2007. *Panorama de la Minería en el Perú*. Lima, Perú: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. OSINERGMIN.
- DENG, H., YE, Z.H. y WONG, M.H., 2004. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, vol. 132, no. 1, pp. 29–40. ISSN 0269-7491. DOI 10.1016/j.envpol.2004.03.030.
- DIEZ LÁZARO, J., 2008. *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados : Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. Santiago de Compostela: Servizo de Publicacións e Intercambio Científico.
- DS-002-2013-MINAM, 2013. Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM - Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Suelo. *Diario Oficial El Peruano*. Lima, Perú, 2013.
- DUDAS, M.J., 1984. Enriched Levels of Arsenic in Post-Active Acid Sulfate Soils in Alberta. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 48, no. 6, pp. 1451. ISSN 0361-5995. DOI 10.2136/sssaj1984.03615995004800060049x.
- DURÁN CUEVAS, P.A., 2010. *Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana*. S.I.: Universitat de Barcelona.
- F. DE ALMEIDA, A.A., R. VALLE, R., MIELKE, M.S. y GOMES, F.P., 2007. Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 19, no. 2, pp. 83–98. ISSN 16770420. DOI 10.1590/S1677-04202007000200001.
- FERNÁNDEZ, L.C., ROJAS AVELIZAPA, N.G., ROLDÁN CARRILLO, T.G., RAMIRÉZ ISLAS, M.E., ZEGARRA MARTINEZ, H.G., URIBE HERNÁNDEZ, R., REYES ÁVILA, R.J., FLORES HERNÁNDEZ, D. y ARCE ORTEGA, J.M., 2006. *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. 1era. Edic. México, D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales,

- Instituto Nacional de Ecología. ISBN 9684890397.
- FITZ, W.J. y WENZEL, W.W., 2002. Arsenic transformations in the soil–rhizosphere–plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of Biotechnology*, vol. 99, no. 3, pp. 259–278. ISSN 01681656. DOI 10.1016/S0168-1656(02)00218-3.
- FREITAS, H., PRASAD, M.N. V y PRATAS, J., 2004. Plant community tolerant to trace elements growing on the degraded soils of São Domingos mine in the south east of Portugal: environmental implications. *Environment international*, vol. 30, no. 1, pp. 65–72. ISSN 0160-4120. DOI 10.1016/S0160-4120(03)00149-1.
- GARCÍA TRUJILLO, Z., 2012. *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. S.I.: Universidad Nacional de Ingeniería.
- GARRIDO VALERO, S., 1994. *Interpretación de análisis de suelos. Guía práctica para muestrear los suelos e interpretar sus análisis*. España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. ISBN 84-341-0810-0.
- GEOCATMIN, 2016. Sistema de Información Geológico Catastral Minero. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)* [en línea]. [Consulta: 10 octubre 2016]. Disponible en: <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>.
- GEORGOPOULOS, P.G., WANG, S.W., GEORGOPOULOS, I.G., YONONE-LIOY, M.J. y LIOY, P.J., 2005. Assessment of human exposure to copper: A case study using the NHEXAS database. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, vol. 16, no. 5, pp. 397. ISSN 1053-4245. DOI 10.1038/sj.jea.7500462.
- GILABERT DE BRITO, J., LÓPEZ DE ROJAS, I. y PÉREZ DE ROBERTI, R., 1990. Análisis de suelos para diagnósticos de fertilidad. *Manual de métodos y procedimientos de referencia*. Maracay: FONAIAP - CENIAP, pp. 164.
- GÓMEZ-SAGASTI, M.T., EPELDE, L., ALKORTA, I. y GARBISU, C., 2016. Reflections on soil contamination research from a biologists point of view. *Applied Soil Ecology*, ISSN 09291393. DOI 10.1016/j.apsoil.2016.04.004.
- HAZELTON, P. y MURPHY, B., 2007. *Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean?* 2nd. Australia: Csiro Publishing. ISBN 978 0 64309 225 9.
- HERRERA CATALÁN, P. y MILLONES DESTÉFANO, O., 2011. *¿Cuál es el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos en el Perú?* . Lima, Perú:
- HERRERA CATALÁN, P. y MILLONES DESTÉFANO, O., 2012. *¿Cuál es el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos en el Perú?* 1. Lima, Perú: Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES).
- HIDALGO CAMARENA, P., ESPINOZA TUMIALAN, P. y FIGUEROA TAUQUINO, R., 2010. Ensayo de adaptación de especies vegetales para la cobertura vegetal de los relaves mineros de la planta concentradora Santa Rosa de Jangas. *Aporte Santiaguino*, vol. 3, no. 1, pp. 18–25. DOI ISSN 2070-836X.
- HOBDAY, H., 2003. *Potential for phytoremediation of a metalliferous mine site at Mt. Costigan, NSW*. S.I.: University of Technology, Sidney.
- HOODA, P.S., 2010. Assessing Bioavailability of Soil Trace Elements. *Trace Elements in Soils*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 227–265. ISBN

9781444319477.

- IANNACONE O., J. y ALVARIÑO F., L., 2005. Efecto Ecotoxicológico de tres Metales Pesados Sobre el Crecimiento Radicular de Cuatro Plantas Vasculares. *Agricultura Técnica*, vol. 65, no. 2, pp. 198–203. ISSN 0365-2807. DOI 10.4067/S0365-28072005000200009.
- IHOBE, S.A., 2010. *Investigación de la contaminación del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco. Guía Metodológica de Análisis Químico*. 1era. Edic. Euskadi: Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.
- INGEMMET, 1983. Geología de los cuadrángulos de Matucana y Huarochirí. En: H. SALAZAR DÍAZ (ed.), *Boletín n° 36. Serie A: Carta Geológica Nacional*. S.l.: s.n., pp. 68.
- INGEMMET, 2006. Mapa Hidrogeológico. *Lima. Sector de Energía y Minas del Perú* [en línea]. Disponible en: <http://www.ingemmet.gob.pe/mapa-hidrogeologico>.
- INRENA, I.N. de R.N., 1995. *Mapa Ecológico del Perú*. Primera. Lima: Ministerio de Agricultura. República del Perú.
- INTAWONGSE, M. y DEAN, J.R., 2006. *Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract*. S.l.: Northumbria University.
- JARA PEÑA, E., GOMÉZ, J., MONTOYA, H., CHANCO, M., MARIANO, M. y CANO, N., 2014. Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, vol. 21, no. October, pp. 145–154.
- JIMÉNEZ, M.N., BACCHETTA, G., CASTI, M., NAVARRO, F.B., LALLENA, A.M. y FERNÁNDEZ ONDOÑO, E., 2011. Potential use in phytoremediation of three plant species growing on contaminated mine-tailing soils in Sardinia. *Ecological Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 392–398. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2010.11.030.
- KABATA-PENDIAS, A., 2011. *Trace Elements in Soils and Plants*. Fourth Edi. Boca Raton: Taylor and Francis Group. ISBN 978-1-4200-9368-1.
- KABATA-PENDIAS, A. y B. MUKHERJEE, A., 2007. *Trace Elements from Soil to Human*. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-32714-1.
- KRÄMER, U., 2010. Metal hyperaccumulation in plants. *Annual review of plant biology*, vol. 61, pp. 517–534. ISSN 1543-5008. DOI 10.1146/annurev-arplant-042809-112156.
- LEGAZ, F. y PRIMO-MILLO, E., 1988. Normas para la fertilización de los agrios. *Series "Fullets. Divulgación" N° 5–88*, 2da. Edici. vol. 29, pp. 9–10.
- LEPP, N.W., 1981. *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants : Effects of Trace Metals on Plant Function*. S.l.: Springer Netherlands. ISBN 9789401173391.
- LERMA REYES, M.I.E., 2006. *Evaluación de suelos y especies vegetales con potencial de acumulación de metales pesados*. S.l.: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, M.J., GARCÍA-LORENZO, M.L. y PÉREZ-SIRVENT, C., 2012. Trace element accumulation in plants from an aridic area affected by mining activities. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 123, pp. 8–12. ISSN 03756742.

DOI 10.1016/j.gexplo.2012.01.007.

- MATTEUCCI, S.D. y COLMA, A., 1982. *Metodología para el estudio de la vegetación*. 1. Washington, D.C.: Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos.
- MCGRATH, S.P. y ZHAO, F.-J., 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 14, no. 3, pp. 277–282. ISSN 09581669. DOI 10.1016/S0958-1669(03)00060-0.
- MEDINA MARCOS, K.D. y MONTANO CHÁVEZ, Y.N., 2014. *Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el Juncus arcticus Willd. y Cortaderia rudiusscula Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza - Ancash 2013*. S.I.: Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- MINAM, (Ministerio del Ambiente), 2014. *Guía para el Muestreo de Suelos*. Lima, Perú: s.n.
- MORENO, F.H., GARCÍA, E.M., LEÓN, V.Q. y ARÉVALO, F.H., 2012. Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú. *Scientia Agropecuaria*, vol. 3, no. 3, pp. 235–247. ISSN 2306-6741.
- NÚÑEZ BARRIGA, A. y CASTAÑEDA HURTADO, I., 1999. Environmental management in a heterogeneous mining industry: the case of Peru. En: A. WARHURST (ed.), *Mining and the Environment: Case studies from the Americas*. 1. Ottawa, Canada: International Development Research Centre, pp. 137–179. ISBN 0-88936-828-7.
- PADILLA SOBRADOS, J.A., RAMÍREZ APOLINARIO, E., BARRA ZEGARRA, R. y BARRETO RODRIGUEZ, J.F., 2009. Niveles de concentración de metales pesados en especies vegetales emergentes en el pasivo minero ambiental de Ticapampa, Catac, Huaraz, Perú. *Aporte Santiaguino*, vol. 2, no. 1, pp. 21–26. DOI ISSN 2070-836X.
- PADMAVATHIAMMA, P.K. y LI, L.Y., 2007. Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 184, no. 1–4, pp. 105–126. ISSN 0049-6979. DOI 10.1007/s11270-007-9401-5.
- PARK, J.H., LAMB, D., PANEERSELVAM, P., CHOPPALA, G., BOLAN, N. y CHUNG, J.-W., 2011. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 185, no. 2, pp. 549–574. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2010.09.082.
- PATRA, M., BHOWMIK, N., BANDOPADHYAY, B. y SHARMAD, A., 2004. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, vol. 52, no. 3, pp. 199–223. ISSN 0098-8472. DOI 10.1016/J.ENVEXPBOT.2004.02.009.
- PERIS MENDOZA, M., 2006. *Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la Provincia de Castellón*. Valencia: Universitat de Valencia.
- RAHMAN, M.A. y HASEGAWA, H., 2011. Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere*, vol. 83, no. 5, pp. 633–646. ISSN 00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2011.02.045.
- RASCIO, N. y NAVARI IZZO, F., 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant science: an international journal of experimental plant biology*, vol. 180, no. 2, pp. 169–81. ISSN 1873-2259. DOI 10.1016/j.plantsci.2010.08.016.

- REICHMAN, S.M., 2002. The responses of plants to metal toxicity. A review focusing on copper, manganese & zinc. , pp. 59.
- SALT, D.E., SMITH, R.D. y RASKIN, I., 1998. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, pp. 643–668.
- SEMPLE, K.T., MORRISS, A.W.J. y PATON, G.I., 2003. Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis. *European Journal of Soil Science*, vol. 54, no. 4, pp. 809–818. ISSN 1351-0754. DOI 10.1046/j.1351-0754.2003.0564.x.
- SMITH, C.E., 1971. Preparing herbarium specimens of vascular plants. *Agriculture Information Bulletin No. 348*, no. 7., pp. 29.
- SSDS, S.S.D.S., 1993. *Soil survey Manual*. S.I.: U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- STEVENS, D.P., MCLAUGHLIN, M.J. y HEINRICH, T., 2003. Determining toxicity of lead and zinc runoff in soils: Salinity effects on metal partitioning and on phytotoxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 22, no. 12, pp. 3017. DOI 10.1897/02-290.
- TANGAHU, B.V., ABDULLAH, S.R.S., BASRI, H., IDRIS, M., ANUAR, N. y MUKHLISIN, M., 2013. Phytoremediation of wastewater containing lead (Pb) in pilot reed bed using *Scirpus grossus*. *International journal of phytoremediation*, vol. 15, no. 7, pp. 663–76. ISSN 1522-6514. DOI 10.1080/15226514.2012.723069.
- TAPIA FERNÁNDEZ, Y., 2007. *Movilidad de metales pesados en sustratos de restos de poda y bisólidos ensayos de fitoextracción con "Rosmarinus officinalis" y "Atriplex halimus"*. S.I.: Universidad Autónoma de Madrid.
- THANGAVEL, P. y SUBHURAM, C. V, 2004. Phytoextraction – Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, vol. B70, no. 1, pp. 109–130.
- TUMIALÁN DE LA CRUZ, P.H., 2003. *Compendio de yacimientos minerales del Perú*. Lima: INGEMMET.
- US EPA, U.S.E.P.A., 2005a. *Ecological Soil Screening Levels for Arsenic Interim Final*. 2005. OSWER Directive 9285.7-68. Washington, DC: s.n.
- US EPA, U.S.E.P.A., 2005b. *Ecological Soil Screening Levels for Cadmium Interim Final*. 2005. OSWER Directive 9285.7-68. Washington, DC: s.n.
- US EPA, U.S.E.P.A., 2005c. *Ecological Soil Screening Levels for Lead Interim Final*. 2005. https://rais.ornl.gov/documents/eco-ssl_cadmium.pdf: s.n.
- US EPA, U.S.E.P.A., 2007. *Ecological Soil Screening Levels for Copper Interim Final*. 2007. OSWER Directive 9285.7-68. Washington, DC: s.n.
- VAN DER ENT, A., BAKER, A.J.M., REEVES, R.D., POLLARD, A.J. y SCHAT, H., 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant and Soil*, vol. 362, no. 1–2, pp. 319–334. DOI 10.1007/s11104-012-1287-3.
- VANGRONSVELD, J., HERZIG, R., WEYENS, N., BOULET, J., ADRIAENSEN, K., RUTTENS, A., THEWYS, T., VASSILEV, A., MEERS, E., NEHNEVAJOVA, E., VAN DER LELIE, D. y MENCH, M., 2009. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 16, no. 7. DOI 10.1007/s11356-009-0213-6.
- VIOLANTE, A., COZZOLINO, V., PERELOMOV, L., CAPORALE, A.. y PIGNA, M., 2010.

- Mobility and Bioavailability of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments. *Journal of soil science and plant nutrition*, vol. 10, no. 3, pp. 268–292. ISSN 0718-9516. DOI 10.4067/S0718-95162010000100005.
- VOLKE SEPÚLVEDA, T., VELASCO TREJO, J.A. y DE LA ROSA PERÉZ, D.A., 2005. *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. México, D. F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat). ISBN 968-817-492-0.
- WANG, Q., CUI, Y. y DONG, Y., 2002. Phytoremediation of Polluted Waters Potentials and Prospects of Wetland Plants. *Acta Biotechnologica*, vol. 22, pp. 199–208.
- WONG, M., 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, vol. 50, no. 6, pp. 775–780. ISSN 00456535. DOI 10.1016/S0045-6535(02)00232-1.
- WORLD BANK, 2006. Republic of Peru Wealth and Sustainability : The Environmental and Social Dimensions of the Mining Sector in Peru. . Washington, D.C.:
- YOON, J., CAO, X., ZHOU, Q. y MA, L.Q., 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *The Science of the total environment*, vol. 368, no. 2–3, pp. 456–64. ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2006.01.016.
- ZAYED, A., GOWTHAMAN, S. y TERRY, N., 1998. Phytoaccumulation of Trace Elements by Wetland Plants: I. Duckweed. *Journal of Environment Quality*, vol. 27, no. 3, pp. 715. ISSN 0047-2425. DOI 10.2134/jeq1998.00472425002700030032x.
- ZHAO, F.-J., MA, J.F., MEHARG, A.A. y MCGRATH, S.P., 2009. Arsenic uptake and metabolism in plants. *The New phytologist*, vol. 181, no. 4, pp. 777–794. ISSN 1469-8137. DOI 10.1111/j.1469-8137.2008.02716.x.

10: ANEXOS

Anexo 1 Fracciones minerales (arena, limo y arcilla) en suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Ticticocha

Puntos de muestreo	Arena	Limo	Arcilla
	%		
P1	64.60	23.64	11.76
P2	60.96	29.28	9.76
P3	68.96	25.42	5.62

Anexo 2 Fracciones minerales (arena, limo y arcilla) en suelos rizosféricos de los alrededores de la laguna Churuca

Puntos de muestreo	Arena	Limo	Arcilla
	P1	74.96	19.42
P2	62.96	31.42	5.62
P3	56.96	31.42	11.62

Anexo 3 Estadística descriptiva de la concentración de metales pesados en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas evaluadas

Estadísticos descriptivos					
Laguna	Metales	N	Media		Desviación estándar
		Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico
Laguna Ticticocha	Arsénico	3	438.8333	88.62282	153.49923
	Cadmio	3	5.8533	.76158	1.31910
	Cobre	3	514.3000	316.93101	548.94061
	Plomo	3	1115.6733	305.25817	528.72266
Laguna Churuca	Arsénico	3	412.0333	91.14158	157.86185
	Cadmio	3	8.6000	2.31897	4.01657
	Cobre	3	556.5333	148.69683	257.55047
	Plomo	3	1679.1167	558.36901	967.12349

Anexo 4 Estadística descriptiva de las características químicas seleccionadas en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas evaluadas.

Estadísticos descriptivos					
Laguna	Propiedades químicas	N	Media		Desviación estándar
		Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico
Laguna Ticticocha	pH	3	6,0500	,93038	1,61146
	Materia orgánica	3	5,1600	2,44000	4,22620
	Conductividad eléctrica	3	,3767	,16231	,28113
	CIC	3	9,6133	3,36771	5,83305
Laguna Churuca	pH	3	5,8233	,21667	,37528
	Materia orgánica	3	4,7233	,73985	1,28146
	Conductividad eléctrica	3	,2000	,07767	,13454
	CIC	3	7,0567	1,36622	2,36635

CIC: Capacidad de intercambio catiónico

Anexo 5 Estadística descriptiva de las fracciones minerales en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas evaluadas

Estadísticos descriptivos					
Laguna	Propiedades físicas	N	Media		Desviación estándar
		Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico
Laguna Ticticocha	arena	3	64,8400	2,31252	4,00540
	limo	3	27,4200	4,00000	6,92820
	arcilla	3	9,0467	1,80799	3,13154
Laguna Churuca	arena	3	64,9600	5,29150	9,16515
	limo	3	26,1133	1,66463	2,88322
	arcilla	3	7,6200	2,00000	3,46410

Anexo 6 Estadística descriptiva de la concentración de metales pesados en los tejidos vegetales de *S. rufescens* de los alrededores de las lagunas evaluadas

Estadísticos descriptivos

Laguna	Metal	Tejido	N	Media		Desviación estándar
			Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico
Laguna Ticticocha	Arsénico	Parte aérea	3	11.413	3.102	5.372
		Raíz	3	22.110	9.806	16.984
	Cadmio	Parte aérea	2	8.845	1.055	1.492
		Raíz	2	6.355	2.625	3.712
	Cobre	Parte aérea	3	44.090	1.070	1.853
		Raíz	3	35.203	7.931	13.737
	Plomo	Parte aérea	3	64.813	39.874	69.063
		Raíz	3	117.283	73.356	127.056
Laguna Churuca	Arsénico	Parte aérea	3	27.243	3.812	6.603
		Raíz	3	32.840	4.122	7.139
	Cadmio	Parte aérea	3	5.383	1.414	2.449
		Raíz	3	4.650	0.945	1.637
	Cobre	Parte aérea	3	154.820	13.473	23.336
		Raíz	3	156.643	29.625	51.312
	Plomo	Parte aérea	3	104.110	3.311	5.736
		Raíz	3	215.043	59.857	103.675

Anexo 7 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk para las concentraciones de metales pesados en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas evaluadas.

Pruebas de normalidad

Laguna	Metal	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Laguna Ticticocha	Arsénico	.936	3	.511
	Cadmio	.891	3	.357
	Cobre	.779	3	.065
	Plomo	.906	3	.405
Laguna Churuca	Arsénico	.888	3	.348
	Cadmio	.914	3	.432
	Cobre	.974	3	.689
	Plomo	.845	3	.227

Anexo 8 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk para las características químicas en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas evaluadas.

Pruebas de normalidad

Lagunas	Propiedades químicas	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Laguna Ticticocha	pH	.866	3	.286
	Materia orgánica	.852	3	.245
	Conductividad eléctrica	.823	3	.170
	CIC	.812	3	.143
Laguna Churuca	pH	.750	3	.000
	Materia orgánica	.936	3	.513
	Conductividad eléctrica	.934	3	.503
	CIC	.978	3	.715

Anexo 9 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk para las concentraciones de metales pesados en los tejidos de *S. rufescens*.

Pruebas de normalidad

Laguna	Metal pesado	Tejidos	Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.
Laguna Ticticocha	Arsénico	Parte aérea	.940	3	.529
		Raíz	.869	3	.294
	Cobre	Parte aérea	.939	3	.522
		Raíz	1,000	3	.966
	Plomo	Parte aérea	.821	3	.166
		Raíz	.775	3	.057
Laguna Churuca	Arsénico	Parte aérea	.933	3	.502
		Raíz	.942	3	.537
	Cadmio	Parte aérea	.774	3	.055
		Raíz	.834	3	.199
	Cobre	Parte aérea	1,000	3	.982
		Raíz	.988	3	.789
	Plomo	Parte aérea	.908	3	.411
		Raíz	.936	3	.510

Anexo 10 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk para las fracciones minerales en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas evaluadas

Pruebas de normalidad

Lagunas		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Laguna Ticticocha	arena	.997	3	.901
	lima	.957	3	.599
	arcilla	.961	3	.621
Laguna Churuca	arena	.964	3	.637
	lima	.750	3	.000
	arcilla	.750	3	.000

Anexo 11 Prueba T de Student para muestras independientes para la comparación de las características químicas seleccionadas en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

Prueba de muestras independientes^a

Parámetros químicos	Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
pH	7.42	.053	.237	4	.824	.22667	.955	-2.436	2.879
			.237	2.216	.833	.22667	.955	-3.522	3.975
Materia orgánica	6.14	.068	.171	4	.872	.43667	2.5497	-6.642	7.516
			.171	2.365	.878	.43667	2.5497	-9.062	9.935
CE	3.22	.147	.982	4	.382	.17667	.1799	-.323	.676
			.982	2.870	.402	.17667	.1799	-.411	.764

CIC	Se asumen varianzas iguales	4.44	.103	.703	4	.521	2.55667	3.6343	-7.534	12.647
	No se asumen varianzas iguales			.703	2.641	.539	2.55667	3.6343	-9.952	15.065

a. No se han calculado estadísticas para uno o más archivos segmentados.
CE: Conductividad eléctrica

Anexo 12 Prueba T de Student para muestras independientes para la comparación de concentraciones de metales pesados en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

Prueba de muestras independientes

Parámetros químicos	Prueba de Levene de calidad de varianzas	prueba t para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Arsénico	Se asumen varianzas iguales	.01	.92	.21	4	.843	26.80	127.13	-326.2	379.8
	No se asumen varianzas iguales			.21	4	.843	26.80	127.13	-326.3	379.9
Cadmio	Se asumen varianzas iguales	4.42	.10	-1.13	4	.323	-2.75	2.44	-9.5	4.0
	No se asumen varianzas iguales			-1.13	2.43	.359	-2.75	2.44	-11.7	6.2
Cobre	Se asumen varianzas iguales	3.47	.14	-.12	4	.910	-42.23	350.08	-1014.2	929.7
	No se asumen varianzas iguales			-.12	2.8	.912	-42.23	350.08	-1192.8	1108.3
Plomo	Se asumen varianzas iguales	2.22	.21	-.89	4	.426	-563.44	636.36	-2330.3	1203.4
	No se asumen varianzas iguales			-.89	3.1	.439	-563.44	636.36	-2553.1	1426.2

Anexo 13 Prueba T de Student para muestras independientes para la comparación de las fracciones minerales en suelos rizosféricos de los alrededores de las lagunas Ticticocha y Churuca.

Prueba de muestras independientes

Parámetros físicos		Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
arena	Se asumen varianzas iguales	2.09	0.22	-0.0	4.000	0.984	-0.120	5.775	-16.153	15.913
	No se asumen varianzas iguales			-0.0	2.737	0.985	-0.120	5.775	-19.538	19.298
limo	Se asumen varianzas iguales	4.48	0.10	-0.3	4.000	0.778	-1.307	4.333	-13.336	10.722
	No se asumen varianzas iguales			-0.3	2.673	0.785	-1.307	4.333	-16.101	13.488
arcilla	Se asumen varianzas iguales	0.13	0.73	0.53	4.000	0.625	1.427	2.696	-6.059	8.912
	No se asumen varianzas iguales			0.53	3.960	0.625	1.427	2.696	-6.089	8.942

Anexo 14 Prueba T de Student para muestras independientes para la comparación entre las concentraciones de metales pesados en los tejidos aéreos (tallo + hojas) y tejidos radicales de *S. rufescens*.

Prueba de muestras independientes

			Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
Laguna	Metal		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
										Inferior	Superior
Laguna Ticticocha	As	Se asumen varianzas iguales	5.555	0.08	-1.04	4	0.357	-10.697	10.284	-39.3	17.9
	Cd	Se asumen varianzas iguales	2.7E+2	0.00	0.88	2	0.472	2.490	2.829	-9.7	14.7
		No se asumen varianzas iguales			0.88	1.3	0.510	2.490	2.829	-18.3	23.3
	Cu	Se asumen varianzas iguales	3.055	0.16	1.11	4	0.329	8.887	8.003	-13.3	31.1
Pb	Se asumen varianzas iguales	2.543	0.19	-0.63	4	0.564	-52.470	83.492	-284.3	179.3	
Laguna Churuca	As	Se asumen varianzas iguales	0.025	0.88	-0.99	4	0.375	-5.597	5.615	-21.19	9.9
	Cd	Se asumen varianzas iguales	1.202	0.34	0.43	4	0.689	0.733	1.701	-3.99	5.5
	Cu	Se asumen varianzas iguales	1.493	0.29	-0.06	4	0.958	-1.823	32.545	-92.2	88.5
	Pb	Se asumen varianzas iguales	8.493	0.04	-1.85	4	0.138	-110.933	59.948	-277.4	55.5
No se asumen varianzas iguales		-1.85			2	0.205	-110.933	59.948	-367.4	145.5	

*As: Arsénico, Cd: Cadmio, Cu: Cobre, Pb: Plomo

Anexo 15 Prueba T de Student para muestras independientes para la comparación entre metales pesados en los tejidos aéreos (tallo + hojas) y tejidos radicales de *S. rufescens* colectadas en ambas lagunas.

Prueba de muestras independientes

			Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
			F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
Inferior	Superior										
As	PA	Se asumen varianzas iguales	0.207	0.673	-3.2	4	0.032	-15.830	4.915	-29.48	-2.18
	R	Se asumen varianzas iguales	3.709	0.126	-1.0	4	0.370	-10.730	10.637	-40.26	18.80
Cd	PA	Se asumen varianzas iguales	1.846	0.267	1.7	3	0.180	3.462	1.988	-2.86	9.79
	R	Se asumen varianzas iguales	10.471	0.048	0.7	3	0.513	1.705	2.306	-5.63	9.04
		No se asumen varianzas iguales			0.6	1	0.632	1.705	2.790	-20.21	23.62
Cu	PA	Se asumen varianzas iguales	3.425	0.138	-8.2	4	0.001	-110.730	13.515	-148.26	-73.21
	R	Se asumen varianzas iguales	2.978	0.159	-3.9	4	0.017	-121.440	30.668	-206.59	-36.29
Pb	PA	Se asumen varianzas iguales	12.527	0.024	-0.9	4	0.382	-39.297	40.011	-150.39	71.79
		No se asumen varianzas iguales			-0.9	2	0.428	-39.297	40.011	-209.2	130.63
	R	Se asumen varianzas iguales	0.354	0.584	-1.0	4	0.360	-97.760	94.678	-360.63	165.11

*As: Arsénico, Cd: Cadmio, Cu: Cobre, Pb: Plomo, PA: Parte aérea, R: Raíz

Anexo 16 Análisis de la varianza para las concentraciones de metales pesados en los suelos rizosféricos de ambas lagunas

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Concentración de metales en suelos rizosféricos

Laguna		Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Laguna Ticticocha	Modelo corregido	1877360,711 ^a	3	625786,904	4,141	,048
	Error	1208894,396	8	151111,799		
	Total	6314415,694	12			
	Total corregido	3086255,107	11			
Laguna Churuca	Modelo corregido	4605141,817 ^b	3	1535047,272	5,981	,019
	Error	2053193,180	8	256649,148		
	Total	11950215,858	12			
	Total corregido	6658334,997	11			

a. R al cuadrado = ,608 (R al cuadrado ajustada = ,461)
 b. R al cuadrado = ,692 (R al cuadrado ajustada = ,576)

Anexo 17 Prueba Tukey para las concentraciones de metales pesados en los suelos rizosféricos de los alrededores de ambas lagunas.

Laguna Ticticocha

Prueba HSD Tukey^{a,b}

Metal pesado	N	Subconjunto	
		1	2
Cadmio	3	5,8533	
Arsénico	3	438,8333	438,8333
Cobre	3	514,3000	514,3000
Plomo	3		1115,6733
Sig.		,429	,222

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 15111,799.
 a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.
 b. Alfa = 0,05.

Laguna Churuca

Prueba HSD Tukey^{a,b}

Metal pesado	N	Subconjunto	
		1	2
Cadmio	3	8,6000	
Arsénico	3	412,0333	412,0333
Cobre	3	556,5333	556,5333
Plomo	3		1679,1167
Sig.		,574	,061

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 256649,148.
 a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.
 b. Alfa = 0,05.

Anexo 18 Análisis de la varianza para las concentraciones de metales pesados en la parte aérea (tallo + hojas) y raíces de *S. rufescens* colectadas en ambas lagunas.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Concentración de metales en tejidos vegetales

Laguna			Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Laguna Ticticocha	Parte aérea	Modelo corregido	5947,872 ^a	3	1982.62	1.44	0.31
		Error	9606.234	7	1372.32		
		Total	28587.584	11			
		Total corregido	15554.107	10			
	Raíz	Modelo corregido	20364,725 ^b	3	6788.24	1.43	0.31
		Error	33254.392	7	4750.63		
		Total	79785.685	11			
		Total corregido	53619.117	10			
Laguna Churuca	Parte aérea	Modelo corregido	42983,945 ^c	3	14327.98	91.40	0.00
		Error	1254.136	8	156.77		
		Total	107992.048	12			
		Total corregido	44238.081	11			
	Raíz	Modelo corregido	90073,413 ^d	3	30024.47	8.94	0.01
		Error	26870.246	8	3358.78		
		Total	242512.818	12			
		Total corregido	116943.659	11			

a. R al cuadrado = ,382 (R al cuadrado ajustada = ,118)

b. R al cuadrado = ,380 (R al cuadrado ajustada = ,114)

c. R al cuadrado = ,972 (R al cuadrado ajustada = ,961)

d. R al cuadrado = ,770 (R al cuadrado ajustada = ,684)

Anexo 19 Prueba Tukey para las concentraciones de metales pesados en la parte aérea (tallo + hojas) y raíces de *S. rufescens* colectadas en ambas lagunas.

Laguna Ticticocha _ Parte aérea

HSD Tukey^{a,b,c}

Metal pesado	N	Subconjunto
		1
Cadmio	2	8,845000
Arsénico	3	11,413333
Cobre	3	44,090000
Plomo	3	64,813333
Sig.		,371

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 1372.319.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 2,667.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

c. Alfa = 0.05.

Laguna Churuca _ Parte aérea

HSD Tukey^{a,b}

Metal pesado	N	Subconjunto		
		1	2	3
Cadmio	3	5,383333		
Arsénico	3	27,243333		
Plomo	3		104,110000	
Cobre	3			154,820
Sig.		,220	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 156,767.
 a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.
 b. Alfa = 0.05.

Laguna Churuca _ Raíz

HSD Tukey^{a,b}

Metal pesado	N	Subconjunto		
		1	2	3
Cadmio	3	4,650000		
Arsénico	3	32,840000	32,840000	
Plomo	3		156,643333	156,643333
Cobre	3			215,043333
Sig.		,931	,114	,624

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas. El término de error es la media cuadrática (Error) = 156,767.
 a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.
 b. Alfa = 0.05.

Laguna Ticticocha _ Raíz

HSD Tukey^{a,b,c}

Metal pesado	N	Subconjunto
		1
Cadmio	2	6,355000
Arsénico	3	22,110000
Cobre	3	35,203333
Plomo	3	117,283333
Sig.		,324

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 4750,627.
 a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 2,667.
 b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.
 c. Alfa = 0.05.

Anexo 20 Resultados del análisis de metales pesados por el método Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP) de los suelos rizosféricos.

**INFORME DE ENSAYO N° 108294-2016
CON VALOR OFICIAL**

RAZÓN SOCIAL : UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DOMICILIO LEGAL : CAL.GERMAN AMEZAGA NRO. 375 OTROS LIMA - LIMA - LIMA
SOLICITADO POR : ABIGAIL DEXTRE RUBINA
REFERENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2016-12-17
FECHA DE INICIO DE ENSAYOS : 2016-12-17
MUESTREADO POR : EL CLIENTE

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C.	Unidades
Metales (Aluminio, Antimonio, Arsénico, Bario, Boro, Berilio, Cadmio, Calcio, Cerio, Cromo, Cobalto, Cobre, Hierro, Plomo, Litio, Magnesio, Manganese, Mercurio, Molibdeno, Niquel, Fósforo, Potasio, Selenio, Plata, Sodio, Estroncio, Talio, Estaño, titanio, Vanadio, Zinc).	EPA Method 200.7, Rev.4.4. EMMC Version. Determination of Metals and trace Elements in Water and Wates by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry. 1994	---	mg/kg

L.C.: Límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de muestreo	2016-10-20	2016-10-20	2016-10-20
Hora de inicio de muestreo (h)	11:00	12:00	12:45
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	Laguna Ticticocha punto 1	Laguna Ticticocha punto 2	Laguna Ticticocha punto 3
Código del Laboratorio	16121679	16121680	16121681
Ensayo	L.D.M.	Unidad	Resultados
Metales			
Arsénico (As)	0.1	mg/kg	267.9 483.7 564.9
Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	4.86 5.35 7.35
Cobre (Cu)	0.1	mg/kg	216.1 179.0 1147.8
Plomo (Pb)	0.06	mg/kg	518.80 1302.96 1525.26

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de muestreo	2016-10-20	2016-10-20	2016-10-20
Hora de inicio de muestreo (h)	15:00	15:45	16:30
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	Laguna Churuca punto 1	Laguna Churuca punto 2	Laguna Churuca punto 3
Código del Laboratorio	16121676	16121677	16121678
Ensayo	L.D.M.	Unidad	Resultados
Metales			
Arsénico (As)	0.1	mg/kg	351.0 591.3 293.8
Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	9.96 11.76 4.08
Cobre (Cu)	0.1	mg/kg	786.6 604.7 278.3
Plomo (Pb)	0.06	mg/kg	2348.31 2118.77 570.27

L.D.M.: límite de detección del método.

*Se muestran los resultados de los metales evaluados en este estudio

Anexo 21 Resultados del análisis de metales pesados por el método Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP) de los tejidos vegetales de *Senecio rufescens* DC.



INFORME DE ENSAYO ICP/INF-300/2016

SOLICITANTE:	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS Atención: Prof. Tito Libio Sánchez Rojas
DOMICILIO:	Av. Universitaria 3400 Campus UNMSM – Lima
SERVICIO SOLICITADO:	Análisis químico en 12 (doce) muestras de tejidos
REFERENCIA:	ICP/PRE-120/2016.
MUESTREO:	Realizado por el solicitante.
FECHA:	2016-12-15.

1. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Fueron recibidas 12 (doce) muestras de tejidos vegetales para la determinación de los ítems establecidos en la referencia.

Muestras de tejidos vegetales:

Código solicitante	Código ICP PUCP
	2016AQ
Ticti_Pto1_PA	0932
Ticti_Pto2_PA	0933
Ticti_Pto3_PA	0934
Ticti_Pto1_R	0935
Ticti_Pto2_R	0936
Ticti_Pto3_R	0937
Churu_Pto1_PA	0938
Churu_Pto2_PA	0939
Churu_Pto3_PA	0940
Churu_Pto1_R	0941
Churu_Pto2_R	0942
Churu_Pto3_R	0943

2. **FECHA DE RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS:** 2016-12-02.
3. **FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYOS:** 2016-12-05 a 2016-12-14.
4. **MÉTODOS DE ENSAYOS**
- Determinación de metales totales: Mediante espectroscopia de emisión por plasma. Método basado en EPA 200.7 – Rev. 4.4 –1994



INFORME DE ENSAYO ICP/INF-300/2016

5. RESULTADOS

ANÁLISIS DE MUESTRAS SÓLIDAS							
Código de muestra	Código Cliente	Ticti_Pto1_PA	Ticti_Pto2_PA	Ticti_Pto3_PA	Ticti_Pto1_R	Ticti_Pto2_R	Ticti_Pto3_R
	Código PUCP 2016AQ	0932	0933	0934	0935	0936	0937
Parámetro	Unidad	Resultados					
Arsénico	mg/Kg	6,96	17,38	9,90	15,02	41,49	9,82
Cadmio	mg/Kg	< 1,00	7,79	9,90	< 1,00	8,98	3,73
Cobre	mg/Kg	43,56	46,15	42,56	34,92	49,08	21,61
Plomo	mg/Kg	19,10	144,26	31,08	40,19	263,93	47,73

ANÁLISIS DE MUESTRAS SÓLIDAS							
Código de muestra	Código Cliente	Churu_Pto1_PA	Churu_Pto2_PA	Churu_Pto3_PA	Churu_Pto1_R	Churu_Pto2_R	Churu_Pto3_R
	Código PUCP 2016AQ	0938	0939	0940	0941	0942	0943
Parámetro	Unidad	Resultados					
Arsénico	mg/Kg	19,88	29,21	32,64	30,86	40,76	26,90
Cadmio	mg/Kg	3,90	4,04	8,21	3,88	3,54	6,53
Cobre	mg/Kg	131,36	155,07	178,03	204,38	102,38	163,17
Plomo	mg/Kg	97,64	108,57	106,12	330,51	184,68	129,94

Los resultados obtenidos son aplicables únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s).

6. OBSERVACIONES

Los resultados reportados para las muestras codificadas como 2016AQ0936 y 2016AQ0941 son promedios de dos réplicas.

EL PRESENTE INFORME DE ENSAYO CONSTA DE 03 (TRES) PÁGINAS DE TEXTO.

Ing. Ilse Eliana Acosta Sullcahuamán.
Jefe (e) del Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 Instituto de Corrosión y Protección

 Prof. ISABEL DÍAZ TANZI de 3
 Directora

AV. UNIVERSITARIA 1801 - LIMA 32 - SAN MIGUEL - APARTADO POSTAL 1761 - LIMA 100
 TELÉFONOS: DIRECTO (0051-1) 626 2510 / 626 2000 anexos 2510 - 3071 / (0051-1) 626 2835 Email: icp@pucp.edu.pe

*Solo se muestran los resultados de los metales evaluados en este estudio

Anexo 22 Autorización de colecta de *Senecio rufescens* con fines de investigación científica



RESOLUCIÓN DE DIRECCIÓN GENERAL N° 369 -2016-SERFOR/DGGSPPFFS

Lima, 15 NOV. 2016

VISTA:

La solicitud de autorización para realizar investigación científica fuera de Áreas Naturales Protegidas con colecta de flora silvestre, presentada por el señor Enoc Éfer Jara Peña, y;

CONSIDERANDO:

Que, mediante Solicitud s/n, ingresada el 14 de octubre de 2016, el señor Enoc Éfer Jara Peña, remite a la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre, la solicitud de autorización con fines de investigación científica fuera de Áreas Naturales Protegidas para el proyecto "Monitoreo y evaluación de la calidad del agua en cabecera de cuenca del río Rimac, lagos y lagunas de la Región Central del Perú para determinar organismos indicadores y marcadores moleculares de contaminación por metales pesados", por el periodo comprendido entre el 17 de octubre de 2016 hasta el 31 de octubre de 2017;

Que, el Protocolo de Nagoya sobre Acceso a los Recursos Genéticos y Participación Justa y Equitativa en los Beneficios que se Deriven de su Utilización al Convenio sobre la Diversidad Biológica (Protocolo de Nagoya), el cual fue firmado por el Perú el 04 de mayo de 2011 y aprobado mediante Resolución Legislativa N° 30217 del 03 de julio de 2014 y ratificado mediante Decreto Supremo N° 029-2014-RE el 04 de julio de 2014, reconoce la importante contribución de la transferencia de tecnología y la cooperación al desarrollo sostenible, para crear capacidad de investigación e innovación que añade valor a los recursos genéticos en los países en desarrollo, conforme a los artículos 16 y 19 del Convenio de Diversidad Biológica;

Que, el literal a) del artículo 8 del Protocolo de Nagoya indica sobre la elaboración y aplicación de la legislación o requisitos reglamentarios sobre acceso y participación en los beneficios de cada país Parte, debe crear condiciones para promover y alentar la investigación que contribuya a la conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica, particularmente en los países en desarrollo, incluyendo medidas simplificadas de acceso para fines de investigación de índole no comercial, teniendo en cuenta la necesidad de abordar el cambio de intención para dicha investigación;

Que, el Protocolo de Nagoya indica sobre los beneficios que se deriven de la utilización de recursos genéticos que pueden ser Monetarios y No Monetarios, definiendo entre otros a los siguientes: Financiación de la investigación y No Monetarios, el intercambio de resultados de investigación y desarrollo, la colaboración, cooperación y contribución en programas de investigación y desarrollo científicos, así como a la formación y capacitación, el fortalecimiento de capacidades para transferencia de tecnología, teniendo en cuenta los usos nacionales de los recursos genéticos en la Parte que aporta los recursos genéticos;

Que, el artículo 140° de la Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, señala que la colecta o extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación orientada a determinación de genotipo, filogenia, sistemática y biogeografía es autorizada siguiendo procedimientos simplificados establecidos por el SERFOR. Los requisitos y procedimientos para la colecta o extracción y la exportación de especímenes de flora y fauna silvestre con fines de investigación o propósito cultural lo establece el reglamento de la presente Ley teniendo en cuenta las normas específicas relacionadas;



Que, el artículo 154° Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, establece que el desarrollo de actividades de investigación básica taxonómica de flora silvestre, relacionadas con estudios moleculares con fines taxonómicos, sistemáticos, filogeográficos, biogeográficos, evolutivos y de genética de la conservación, entre otras investigaciones sin fines comerciales, son aprobadas mediante autorizaciones de investigación científica;

Que, mediante Resolución de Dirección Ejecutiva N° 250-2016-SERFOR-DE, emitido por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre-SERFOR, se designó al Ing. Walter Darío Nalvarte Armas las funciones de Director General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre – SERFOR;

Que, el Informe N° 0585-2016-SERFOR-DGGSPFFS/DGSPF, de fecha 14 de noviembre de 2016, emitido por la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal, concluye que la solicitud de autorización con fines de investigación científica fuera de Áreas Naturales Protegidas, con colecta de flora es una investigación relacionada al análisis de la calidad ambiental, que incluye pruebas moleculares a través de la evaluación de toxicidad por Cd+2 en germinación in vitro de *Senecio* sp. con fines científicos, para el proyecto "Monitoreo y evaluación de la calidad del agua en cabecera de cuenca del río Rimac, lagos y lagunas de la Región Central del Perú para determinar organismos indicadores y marcadores moleculares de contaminación por metales pesados", en el marco del artículo 154° del Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado con Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI. Asimismo, que los resultados de la investigación darán cuenta de los mecanismos de fitorremediación probables en áreas afectadas por relaves y otros contaminantes; informarán sobre la calidad del agua y sobre las posibles especies promisorias, así como también evaluarán el estado de amenaza de las especies de acuerdo a la categorización que indica el Decreto Supremo N° 043-2006-AG, lo cual alimenta el conocimiento de la diversidad biológica para la gestión del patrimonio forestal;



Que, el precitado Informe concluye además, en correspondencia con los Artículos 111° y 117° del antes mencionado Reglamento, que los resultados de la investigación permitirán que el SERFOR identifique áreas piloto para la recuperación de áreas degradadas;

En uso de las atribuciones conferidas por el artículo 53° del Reglamento de Organización y Funciones del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre-SERFOR, aprobado por Decreto Supremo N° 007-2013-MINAGRI, el mismo que en su literal "g" del mencionado artículo señala como una de las funciones de la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre, la de otorgar permisos de investigación o de difusión cultural con o sin colecta de flora y fauna silvestre y sus recursos genéticos.

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Otorgar la autorización con fines de investigación científica fuera de Áreas Naturales Protegidas con colecta de flora silvestre, al señor Enoc Éfer Jara Peña y a los tesisistas señalados en el Cuadro N° 01, correspondiéndole el Código de Autorización N° AUT-IFL-2016-046.

Cuadro N° 01: Especialistas que participarán de la Investigación

Nombres y Apellidos	Organización a la que pertenece	Participación en el Proyecto	PASAPORTE/ DNI N°
Enoc Éfer Jara Peña	Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Responsable del equipo técnico del área de Botánica	08456362
Abigail Dextre Rubina	Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Tesista	47638321
Miguel Alexander Tineo Guevara	Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Tesista	72750746

Artículo 2°.- La autorización indicada en el artículo precedente incluye la colecta de flora silvestre de 03-05 individuos completos así como 02 muestras herborizadas de especies de las familias botánicas: Amaranthaceae, Apiaceae, Asteraceae, Brassicaceae, Calceolariaceae, Callitrichaceae, Campanulaceae, Caryophyllaceae, Clusiaceae, Cyperaceae, Elatinaceae, Fabaceae, Gentianaceae, Geraniaceae, Haloragaceae, Iridaceae, Juncaceae, Lamiaceae, Malvaceae, Onagraceae, Plantaginaceae, Polygonaceae, Poaceae, Ranunculaceae, Rosaceae, Scrophulariaceae; en varias estaciones de muestreo según detalle del Anexo 1, para investigación científica a través de pruebas moleculares como parte del proyecto "Monitoreo y evaluación de la calidad del agua en cabecera de cuenca del río Rimac, lagos y lagunas de la Región Central del Perú para determinar organismos indicadores y marcadores moleculares de contaminación por metales pesados", por un periodo de doce (12) meses, contado a partir del día siguiente a la notificación de la Resolución de Dirección General:

Artículo 3°.- El titular de la autorización y los investigadores que forman parte del Proyecto, tienen las siguientes obligaciones:

- No extraer especímenes, ni muestras biológicas de flora silvestre no autorizada; no ceder los mismos a terceras personas, ni utilizarlos para fines distintos a lo autorizado.
- No contactar ni ingresar a los territorios comunales sin contar con la autorización de las autoridades comunales correspondientes.
- Retirar todo el material empleado para la ejecución del presente estudio una vez terminado el trabajo de campo y levantamiento de información biológica.
- Sólo en el caso que por razones científicas acotadas se requiera enviar al extranjero parte del material colectado, el interesado deberá gestionar el correspondiente Permiso de Exportación ante la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR, así como pasar el control respectivo. Los ejemplares únicos de los grupos taxonómicos colectados y holotipos, sólo podrán ser exportados en calidad de préstamo.



- e) Comunicar a las Administraciones Técnicas Forestales y de Fauna Silvestre Lima y Sierra Central, la entrada y salida del personal científico en campo, así como, informar brevemente sobre el tipo de muestras colectadas por especie.
- f) Entregar a la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR, una (01) copia del Informe Final (incluyendo versión digital) como resultado de la autorización otorgada, copias del material fotográfico y/o slides que puedan ser utilizadas para difusión.
- g) Entregar una (01) copia de las publicaciones producto de la investigación realizada en formato impreso y digital, que incluya la lista taxonómica de las especies de flora silvestre objeto de la presente autorización de colecta con las respectivas coordenadas (en formato excel).
- h) Los Informes Parciales e Informe Final deberán contener una lista taxonómica de las especies objeto de la presente autorización de colecta, en formato MS Excel. Esta lista deberá contar con sus respectivas coordenadas en formato UTM (Datum WGS84), incluyendo la zona (17, 18 o 19). El formato de Informe Parcial y Final que debe ser usado se encuentra en el Anexo 2 de la presente resolución.
- i) La entrega por parte del titular del citado estudio de lo indicado en los literales d) y g) no deberá ser mayor a los seis (06) meses al vencimiento de la presente autorización.
- j) Indicar el número de la Resolución en las publicaciones generadas a partir de la autorización concedida.

Artículo 4°.- El desarrollo de investigaciones científicas que no involucren estudios moleculares con fines taxonómicos, sistemáticos, filogeográficos, biogeográficos, evolutivos y de genética de la conservación, entre otras investigaciones sin fines comerciales, requiere de la suscripción de un contrato de acceso a los recursos genéticos con el SERFOR.

Artículo 5°.- El titular de la mencionada investigación deberá implementar todas las medidas de seguridad y eliminación de impactos que se puedan producir por las actividades propias de las actividades de las fases de campo, como toma de datos, tratamiento y transporte de muestras, transporte de equipos, personal, etc.

Artículo 6°.- La Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR, no se responsabiliza por accidentes o daños sufridos por el solicitante de esta autorización, durante la ejecución del Proyecto; asimismo, se reserva el derecho de demandar del Proyecto de investigación los cambios a que hubiese lugar en los casos en que se dicten nuevas disposiciones legales o se formulen ajustes sobre la presente autorización.

Artículo 7°.- El titular autorizado y los tesisistas que forman parte del proyecto, se encuentran sujetos al cumplimiento de las obligaciones establecidas para la presente autorización con fines de investigación otorgada.

Artículo 8°.- Notificar la presente Resolución al señor Enoc Éfer Jara Peña, a la Dirección General de Información y Ordenamiento Forestal y de Fauna Silvestre, a la Dirección de Control de la Gestión del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre y a las Administraciones Técnicas Forestales y de Fauna Silvestre Lima y Sierra Central, para su conocimiento y fines correspondientes.

Artículo 9°.- Disponer la publicación de la presente Resolución en el Portal Web del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre: www.serfor.gob.pe.

Regístrese y Comuníquese



Ing. Walter Nalvarte Armas
Director General
Dirección General de Gestión Sostenible del
Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre
Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR



ANEXO 1

Relación de lagunas y represas que serán evaluadas en el Proyecto

Departamento	Provincia	Distrito	Laguna/Represa	COORDENADAS UTM 18L	
				E	S
Junín	Yauli	Morococha	Laguna Huascacocha	375979	8688142
Junín	Yauli	Morococha	Laguna Churuca	374531	8717151
Junín	Yauli	Morococha	Laguna Santa Catalina	372851	8718054
Junín	Junín	Junín	Laguna Yananyacu	395776	8749200
Junín	Junín	Junín	Laguna Marca	393561	8749881
Junín	Junín	Junín	Laguna Huacracocho	387636	8752661
Lima	Huachochiri	Carampoma	Laguna Canchis	353822	8720885
Lima	Huachochiri	Chicla	Laguna Ticticocha	369106	8716689
Lima	Huachochiri	San Mateo de Huanchor	Represa Yuracmayo	378626	8689830
Pasco	Pasco	Chaupimarca	Relavera Yanamate	363470	8815209
Pasco	Pasco	San Francisco de Asís de Yaruyacán	Relavera Milpo	367933	8825487
Pasco	Pasco	Santa Ana de Tusi	Laguna Alcacocha	357434	8828558
Pasco	Pasco	Simón Bolívar	Laguna Huicro	358188	8822707
Pasco	Pasco	Simón Bolívar	Laguna Quiulacocha	359669	8816914
Pasco	Pasco	Huayllay	Unidad Minera Huarón	347376	8784119
Pasco	Pasco	Huayllay	Laguna Huarón	344493	8782081
Pasco	Pasco	Huayllay	Laguna Huaroncocha	343525	8780837

