

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**



TESIS

**Evaluación de contenidos metálicos en las especies altoandinas
Calamagrostis rigida, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el
entorno de la laguna de Yanamate, para determinar su potencial
fitorremediador - Pasco - 2019**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autor: Bach. Edith Lorenza HUARANGA SANCHEZ

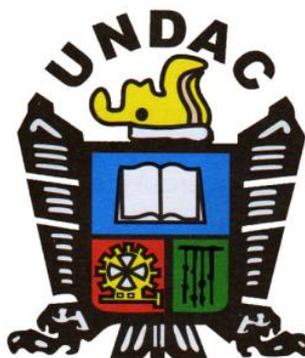
Asesor: Mg. Rosario Marcela VASQUEZ GARCIA

Cerro de Pasco - Perú – 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**



TESIS

**Evaluación de contenidos metálicos en las especies altoandinas
Calamagrostis rigida, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el
entorno de la laguna de Yanamate, para determinar su potencial
fitorremediador - Pasco - 2019**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Rommel Luis LOPEZ ALVARADO
PRESIDENTE

Ing. Miguel Ángel BASUALDO BERNUY
MIEMBRO

Mg. Lucio ROJAS VITOR
MIEMBRO

DEDICATORIA

A Dios, mi fuente de fortaleza y sabiduría,
A mi familia, el pilar de mis metas profesionales y mi razón de ser.

RESUMEN

La laguna de Yanamate utilizada para el vertimiento de aguas ácidas provenientes de la unidad minera de producción de Cerro de Pasco, en 1987 se dio el proceso de capilaridad, donde el nivel de agua alcanzó su máxima cota, afectando aproximadamente 300 metros a la redonda, dándose la contaminación de los suelos, y con ello la escasa vegetación superficial de la zona.

A partir del concepto: 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, se planteó esta investigación teniendo como problema principal ***¿Qué potencial fitorremediador de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio presentan las especies altoandinas Calamagrostis rigida, Trisetum spicatum y Senecio rufescens en el entorno de la Laguna de Yanamate al ser evaluadas?***, para lo cual se desarrolló investigación bajo el enfoque cuantitativo y descriptivo-explicativo, con un diseño no experimental-correlacional, utilizándose visualización en campo para la identificación de los impactos ambientales y la flora existente en el entorno de la laguna. Además, la toma de muestras se realizó en tres estaciones con tres muestras por estación (suelo rizosférico. parte aérea y raíces). Concluyéndose que, las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate favorecen su subsistencia en un suelo contaminado. Además, se determina que la especie altoandina *Trisetum spicatum*, presenta mayor contenido de cobre (246 mg/kg MS), hierro (19088 mg/kg MS), zinc (748 mg/kg MS), plomo (255.25 mg/kg MS) y cadmio (11.40 mg/kg MS) acumulada principalmente en sus tejidos radicales, definiéndose como la especie con mayor potencial fitorremediador en su categoría *fitoestabilizador*.

Palabras claves: Especies altoandinas, Laguna de Yanamate, contenidos metálicos, potencial fitorremediador, remediación, fitoestabilización.

SUMMARY

The Yanamate lagoon used for the discharge of acidic waters from the Cerro de Pasco mining production unit, in 1987 the capillarity process took place, where the water level reached its maximum level, affecting approximately 300 meters around, giving the contamination of the soils, and with it the little superficial vegetation of the zone.

Based on the concept: the ability of some native plants to tolerate extreme concentrations of heavy metals in soils would indicate their potential to be used in the remediation of sites contaminated by metals, this research was proposed having as the main problem: ***What potential phytoremediation of copper, iron, zinc, lead and cadmium present the high Andean species Calamagrostis rigida, Trisetum spicatum and Senecio rufescens in the surroundings of the Yanamate Lagoon when evaluated?***, for which research was developed under the quantitative and descriptive-explanatory approach, with a non-experimental-correlational design, using visualization in the field to identify the environmental impacts and the existing flora in the surroundings of the lagoon. In addition, the sampling was carried out in three stations with three samples per station (rhizospheric soil. Aerial part and roots). Concluding that, the physical-chemical properties of the rhizospheric soils of the high Andean species *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* and *Calamagrostis rigida* in the surroundings of the Yanamate Lagoon favor their subsistence in a contaminated soil. In addition, it is determined that the high Andean species *Trisetum spicatum* has a higher content of copper (246 mg / kg DM), iron (19088 mg / kg DM), zinc (748 mg / kg DM), lead (255.25 mg / kg DM) and cadmium (11.40 mg / kg DM) accumulated mainly in its root tissues, defining itself as the species with the greatest phytoremediation potential in its phytostabilizer category.

Keywords: High Andean species, Yanamate Lagoon, metallic contents, phytoremediation potential, remediation, phytostabilization.

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 su desarrollo para hacer frente a los numerosos problemas de contaminación a nivel nacional.

Las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* fueron seleccionadas en este estudio debido a que son especies de amplia distribución en el Perú, que han sido reportadas alrededor de lagunas visiblemente no impactadas, así como también cerca de lagunas altamente contaminadas por actividades mineras, este comportamiento indicaría que estas especies presentan caracteres prometedores para los propósitos de remediación. Por lo que se determinó evaluar el contenido de

cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* que crecen en el entorno de la laguna de Yanamate de la región Pasco, así como de los suelos rizosféricos asociados. Asimismo, se determinaron algunas propiedades físicas y químicas de los suelos rizosféricos (textura, pH, CaCO₃, materia orgánica, conductividad eléctrica y CIC) 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 rizosféricos 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)

ÍNDICE

DEDICATORIA

RESUMEN

SUMMARY

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE DE FIGURAS IX

ÍNDICE DE TABLAS IX

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS XI

ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN..... XII

CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 1

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA..... 1

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....2

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA3

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS4

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN4

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....5

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....6

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO.....6

2.2. BASE TEÓRICAS – CIENTÍFICAS..... 10

2.2.1. Fitorremediación..... 10

2.2.2. Movilización natural de los metales 12

2.2.3. Metales pesados en suelos..... 12

2.2.4. Dinámica de los metales en el suelo 13

2.2.5.	Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo	16
2.2.6.	Factores del suelo que afectan la acumulación	18
2.1.1.	Interpretación de Análisis de Datos	21
2.1.2.	Especies acumuladoras	23
2.1.3.	Índices de valoración de tolerancia de metales.....	26
2.1.4.	Categorías de la fitorremediación	28
2.2.7.	Marco normativo.....	30
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	31
2.4.	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	34
2.1.5.	Hipótesis General.....	34
2.1.6.	Hipótesis Específicos	34
2.5.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	34
2.6.	DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES.....	35
	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	36
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	36
3.2.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	36
3.3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA	37
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	37
3.6.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	38
3.7.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO	38
3.8.	SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	39
3.9.	ORIENTACIÓN ÉTICA.....	39

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO	40
4.1.1. Descripción del Área de Estudio	40
4.1.2. Especies Altoandinas <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i>	43
4.1.3. Selección de las Estaciones de Muestreo	47
4.1.4. Diseño de Muestra	50
4.1.5. Cálculo de los Índices de Valoración de Tolerancia de <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> a los Contenidos Metálicos (Cu, Fe, Zn, Pb, Cd) 52	
4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	54
4.2.1. Principales propiedades físico-químicas del suelo	54
4.2.2. Contenidos metálicos de los Suelos Rizosféricos	57
4.2.3. Contenido de Cu, Fe, Zn, Pb y Cd en los tejidos de las especies altoandinas <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i>	62
4.2.4. Índices de valoración de tolerancia de las especies altoandinas <i>Senecio</i> <i>rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> a los contenidos metálicos... 72	
4.2.5. Interpretación y presentación de resultados (resumen final)	78
4.3. PRUEBAS DE HIPÓTESIS	81
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	81
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tecnologías y usos de la fitorremediación.....	11
Figura 2: Movilización natural de metales pesados por acción del agua y viento.....	12
Figura 3: Dinámica de los Metales Pesados en el Suelo.....	13
Figura 4: Factores que afectan a la concentración de elementos en el suelo.....	14
Figura 5: Dinámica de los metales pesados en el sistema suelo-planta.....	15
Figura 6: Compartimentalización de los metales en el suelo.....	16
Figura 7: Cmp: Concentración de metal en planta.....	26
Figura 8: Ubicación de la Laguna de Yanamate.....	40
Figura 9: Etiqueta de las muestras tomadas en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación del punto de muestreo de suelo en la cuenca del río San Juan durante el año 2015.....	7
Tabla 2: Resultados físico-químicos del análisis de suelos cercanos a la cuenca del río San Juan. Marzo – 2015.....	7
Tabla 3: Contenido de Metales Pesados en el Stipa Ichu.....	9
Tabla 4: Formas químicas de los metales en el suelo y su disponibilidad relativa para las plantas.....	17
Tabla 5: Interpretación de pH.....	21
Tabla 6: Interpretación de la conductividad eléctrica.....	21
Tabla 7: Interpretación de carbonatos (CaCO ₃).....	21
Tabla 8: Interpretación del contenido de materia orgánica (M.O).....	22
Tabla 9: Interpretación de la capacidad de intercambio catiónico.....	22
Tabla 10: Interpretación de fosforo y potasio.....	22

Tabla 11: Niveles máximos de tolerancia de los minerales en forrajes en comparación con los niveles de la dieta para el ganado doméstico, en nuestro caso ovejas.	22
Tabla 12: Interpretación de micronutrientes en el suelo.....	23
Tabla 13: Concentración de metales pesados en suelos de acuerdo a los estándares ambientales nacional e internacional.....	30
Tabla 14: Análisis de Propiedades químicas de los suelos rizosféricos de las especies altoandinas <i>Calamagrostis Rigida</i> , <i>Trisetum Spicatum</i> y <i>Senecio Rufescens</i> evaluadas en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	55
Tabla 15: Fracciones minerales (arena, limo y arcilla) de los suelos rizosféricos de <i>Calamagrostis Rigida</i> , <i>Trisetum Spicatum</i> y <i>Senecio Rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	57
Tabla 16: Contenidos metálicos en mg/kg de los suelos rizosféricos del <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.	57
Tabla 17: Contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate y estándares comparativos de acuerdo a la legislación nacional e internacional para suelos de uso agrícola.	61
Tabla 18: Contenido de Cu (mg/kg MS) en los tejidos de <i>S. rufescens</i> , <i>T. Spicatum</i> y <i>C. Rigida</i> que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.	63
Tabla 19: Contenido de Fe (mg/kg MS) en los tejidos de <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.	65
Tabla 20: Contenido de Zn (mg/kg MS) en los tejidos de <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.	66
Tabla 21: Contenido de Pb (mg/kg MS) en los tejidos de <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.	69
Tabla 22: Contenido de Cd (mg/kg MS) en los tejidos de <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.	71

Tabla 23: Factor de Bioconcentración del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos aéreos de <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.	73
Tabla 24: Factor de Bioconcentración del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las raíces de <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.	75
Tabla 25: Factor de traslocación del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las especies altoandinas <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.	76
Tabla 26: Interpretación de resultados de análisis de suelos rizosféricos de las especies altoandinas <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i>	78
Tabla 27: Interpretación de resultados de análisis de los tejidos aéreos las especies altoandinas <i>S. rufescens</i> , <i>T. spicatum</i> y <i>C. rigida</i>	79
Tabla 28: Factor de Bioconcentración (FBC) y de Factor de Traslocación (TF) del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> evaluadas en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	80

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Rocas calizas altamente mineralizadas.	41
Fotografía 2: Escaza vegetación producto del suelo ácido.	42
Fotografía 3: Ganadería local (Alpacas y ovejas)	43
Fotografía 4: Porte del <i>Senecio rufescens</i> DC en el entorno de la Laguna de Yanamate, Pasco.....	44
Fotografía 5: Porte del <i>Trisetum spicatum</i> en el entorno de la laguna de Yanamate, Pasco.....	46

Fotografía 6: Porte del <i>Calamagrostis rigida</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate, Pasco.....	47
Fotografía 7: Zona de muestreo de especies altoandinas en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	49
Fotografía 9: Muestras colectados en bolsas herméticas (suelo rizosférico, raíces y parte aérea).....	50

ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1: Identificación de las estaciones de muestreo de las especies altoandinas en el entorno de la laguna de Yanamate.....	49
Ilustración 3: Propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos evaluados en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	54
Ilustración 4: Contenidos metálicos en los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.....	59
Ilustración 5: Contenido de Hierro en los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate.....	60
Ilustración 6: Contenido de Cadmio en los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.....	60
Ilustración 7: Contenido de cobre en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> en el entorno de la laguna de Yanamate.....	64
Ilustración 8: Contenido de hierro en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> en el entorno de la laguna de Yanamate.....	66
Ilustración 9: Contenido de zinc en los tejidos de <i>Senecio rufescens</i> , <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Calamagrostis rigida</i> en el entorno de la laguna de Yanamate.....	68

Ilustración 10: Contenido de plomo en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la laguna de Yanamate.....70

Ilustración 11: Contenido de cadmio en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.....72

Ilustración 12: FBC del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio de los tejidos aéreos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.....73

Ilustración 13: FBC del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos radicales de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.....75

Ilustración 14: FT de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio de las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.....77

CAPÍTULO I.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

La laguna de Yanamate ubicada en el distrito de Tinyahuarco era una laguna natural, que abastecía de agua a una parte de la ciudad. Además, solía utilizarse como fuente de bebida animal para los ganados del pastoreo local, pero a partir del año 1981, viene siendo utilizada para el vertimiento de aguas ácidas provenientes de la unidad minera de producción de Cerro de Pasco. Las aguas ácidas compuestas con raffinato (colas) como producto del proceso de extracción de solventes y electrodeposición de cobre, así como del agua barren excedente generado en interior mina fueron vertidas a la Laguna de Yanamate y en un porcentaje menor de aguas ácidas han sido generadas por otras fuentes superficiales (Jaime N., 1999)

Según apreciaciones de investigaciones anteriores, los suelos de los alrededores de la laguna de Yanamate, muestran un pH fuertemente ácido, alta conductividad (Golder Associates Perú, 2000), variaciones significativas en las propiedades físico-químicas, así como altas concentraciones de contaminantes metálicos y sulfatos, provocados por el proceso de capilaridad ocurrido en 1987, donde el nivel de agua alcanzó su máxima

cota, afectando aproximadamente 300 metros a la redonda (2.7 km² de área superficial aprox.), dando como resultados la erosión de los suelos, reflejándose actualmente en la escasa vegetación superficial de la zona, constituida por pastos de tallo corto y raíces superficiales. Con el paso de los años, la laguna de Yanamate, se ha convertido en un potencial de riesgo socioambiental, por los desechos secos y pulverizados expuestos al aire y al viento que los transportan y lo depositan en otras áreas, más o menos cercana, dependiendo de la intensidad y dirección del viento.

Pese a ello, los responsables no asumen ninguna alternativa de solución frente al deterioro del entorno, justificados en la complejidad de la contaminación y en los elevados costos de inversión.

A pesar de esta crítica situación, durante los recorridos por el entorno de la laguna de Yanamate, se observó presencia de algunas especies altoandinas en áreas altamente contaminados, lo que indica que estas especies han logrado adaptarse a los suelos contaminados, y se han convertido en potenciales fitorremediadores a ser utilizados en proyectos de recuperación de suelos de la laguna, razón por la cual se planteó esta investigación, con la finalidad de determinar el potencial fitorremediador de las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens*, que permitió establecer conceptos importantes para lograr la mejora en la calidad de los suelos, a fin de incrementar la flora existente cubriendo la superficie contaminada expuesta, lograr la recuperación de los suelos y reducir los riesgos socioambientales actuales, a través de la fitorremediación, tecnología amigable con el ambiente y de bajo costo de inversión y mantenimiento.

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Se centra en el uso de especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* como agentes descontaminantes de suelos con altos contenidos metálicos, ya que representa una alternativa tecnológica económica, limpia y amigable que merece ser estudiada y propuesta, puesto que algunas plantas nativas poseen capacidad para tolerar concentraciones

extremas de contaminantes metálicos en los suelos indicando su potencial fitorremediador, lo cual representaría una oportunidad para revertir la situación actual de la laguna de Yanamate.

Se enfoca en brindar nuevos conocimientos a estudiantes, docentes, investigadores, etc. apasionados por el tema de Biorremediación de Suelos mediante el uso de especies altoandinas, como orientación y apoyo para desarrollar futuros proyectos de investigación, teniendo un alcance actual aproximado de 300 metros a la redonda de la laguna de Yanamate.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Problema Principal

¿Qué potencial fitorremediador de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio presentan las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la Laguna de Yanamate al ser evaluadas?

1.3.2. Problemas Específicos

- a. ¿Existen alteraciones en las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate?
- b. ¿Hay contaminación por la presencia de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS en los suelos rizosféricos del entorno de la Laguna de Yanamate?
- c. ¿En qué parte de sus tejidos, radicales o aéreos, de las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* del entorno de la Laguna de Yanamate presentan mayor contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS?
- d. ¿Las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la Laguna de Yanamate son fitoacumuladores o fitoestabilizadores según los calculos de Factor

de Bioconcentración (FBC) y de Traslocación (FT) de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio?

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar los contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos de las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate para determinar su potencial fitorremediador.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a. Determinar las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos en el entorno de la laguna de Yanamate.
- b. Determinar el contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de los suelos rizosféricos en el entorno de la laguna de Yanamate.
- c. Determinar el contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS en los tejidos aéreos y radicales de las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate.
- d. Calcular el Factor de bioconcentración (FBC) y de traslocación (FT) de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se justifica en la necesidad de recuperar los suelos agrícolas de C.C. Yanamate, con el fin de proteger el medio ambiente y la salud humana de los efectos nocivos de la contaminación. Además, está sustentado en las

normativas ambientales nacionales vigentes tales como: Constitución Política del Perú (Numeral 22 del artículo 2°), Ley General del Ambiente (artículo I del Título Preliminar y artículo 3° de la Ley N° 28611), Estándar de Calidad Ambiental de Suelos (D.S. N° 002-2013-MINAM y D.S. N° 011-2017-MINAM), etc. pretende dar a conocer el potencial fitorremediador de las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* para remediar suelos con altos contenidos de metales pesados y establecer a partir de los resultados, propuestas de solución frente a la problemática de contaminación de suelos de la laguna de Yanamate, que viene afectando socioambientalmente a los pobladores lugareños. Por ello se planteó, como propuesta aplicar la fitorremediación, alternativa amigable con el ambiente, de bajo costo de inversión y que generará beneficios para las comunidades aledañas.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- a) Factor presupuestal por los elevados costos de laboratorio para el análisis de muestras de suelos y tejido vegetal (tallos, hojas y raíces)
- b) Escasa información y estudios sobre algunas especies Altoandinas en proyectos de investigación.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

2.1.1. **Carmen, Avelino.** Eficacia de la Fitoextracción para la Remediación de Suelos Contaminados en Villa de Pasco. Tesis de Pregrado – UNMSM. 2013

En su trabajo de investigación utilizando cuatro especies vegetales concluye que la especie *Sonchus oleraceus* (especie A), presentó mayor eficacia para absorber arsénico, el *Lepidium bipinnatifidum* (especie B) para absorber el cadmio, mientras que el *plantago orbignyana* (especie C) para el plomo y el *Bidens triplinervia* (especie D) para caso del zinc; luego se determinó el Índice de Bioconcentración y el Factor de remediación de las especies, que indican que éstas especies representan un gran potencial para remediar suelos contaminados por metales.

2.1.2. **OEFA.** Informe de Evaluación Ambiental de la cuenca del río San Juan, ejecutado durante el año 2015.

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA durante el año 2015 realizó una evaluación de la cuenca del Río San Juan, con el objetivo de determinar el estado de la calidad ambiental de la cuenca, mediante monitoreos ambientales que constituyeron la toma de muestras de agua, sedimentos y suelos, de las cuales, una muestra de suelo fue tomada en la Laguna de Yanamate.

Tabla 1: Ubicación del punto de muestreo de suelo en la cuenca del río San Juan durante el año 2015

Zona Evaluada	Código del Punto de Muestreo	Coordenadas UTM – WGS84		Altitud (msnm)	Descripción
	Suelos	Este	Norte		
Cerca del Río San Juan	SU-13	8 814958	363515	4348	Cerca de la Laguna Yanamate

Tabla 2: Resultados físico-químicos del análisis de suelos cercanos a la cuenca del río San Juan. Marzo – 2015

Metales Totales (mg/Kg)	Punto de muestreo SU-13	ECA SUELO D.S. 003-2013-MINAM Suelo Agrícola
Aluminio	1056	-
Antimonio	44,3	-
Arsénico	551	50
Bario	16,6	750
Berilio	<0,001	-
Cerio	3,3149	-
Boro	13,2	-
Cadmio	0,323	1,4
Calcio	55376	-
Cobalto	0,212	-
Cobre	33	-
Cromo	2,6	-
Estaño	5,2	-
Estroncio	254	-
Fosforo	432	-
Hierro	13328	-

Litio	0,67	-
Magnesio	351	-
Manganeso	14,5	-
Molibdeno	0,958	-
Niquel	1,27	-
Plata	<0,006	-
Plomo	137	70,0
Potasio	1684	-
Selenio	0,099	-
Sodio	148	-
Talio	14,3	-
Titanio	100	-
Uranio	0,1134	-
Vanadio	6,5	-
Zinc	62	-
Mercurio	<0,03	6,6
Bismuto	68,6	-
Tolio	0,4356	-
Wolframio	0,2375	-

Fuente: Informe de Ensayo N° 150700 - Environmental Testing Laboratory S.A.C. (Francisco, Edgar, Jean, Diber, & Carlos, 2015)

El OEFA concluye que las concentraciones de cianuro libre, cromo VI, arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) total determinadas en los puntos de muestreo adyacentes a la cuenca del río San Juan, incluyendo Yanamate, superaron en casi todos los casos los valores establecidos en los ECA para Suelos para uso agrícola.

2.1.3. **Javier, Paredes.** Evaluación de la Aplicabilidad de Especies Forestales de la Serranía Peruana en Fitorremediación de Relaves Mineros. ECIPerú. 2015

Define que la fitorremediación es una tecnología alternativa de bajo costo utilizada para descontaminar suelos con metales pesados. Además, en su trabajo de investigación realizado con ensayos evaluó el uso de especies forestales de la sierra peruana (*Acacia visco*, *Buddleja coriacea*, *Eucalyptus*

globulus, *Myoporum laetum*, *Polylepis racemosa* y *Schinus molle*) para el tratamiento de relaves mineros. Hizo un análisis fisicoquímico al relave para determinar el pH y la concentración de elementos químicos. Las especies forestales demostraron tener gran tolerancia a suelos contaminados y se obtuvo una remoción de los elementos químicos: antimonio (Sb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plata (Ag) y plomo (Pb).

2.1.4. **July, Picoy.** Tratamiento de la Contaminación de los Suelos de la Laguna de Yanamate Empleando la Tecnología de la Fitorremediación 2016. Tesis de Pregrado - UNDAC

En su trabajo de investigación concluye que los suelos de la Laguna de Yanamate se encuentran altamente erosionados, sin cobertura vegetal y la pérdida total de los componentes físicos, químicos y biológicos, con sustento en la tabla N° 3, la cual indica los resultados del contenido de metales pesados en la especie altoandina *Stipa Ichu*, determinando que esta especie poseen un alto potencial acumulando metales pesados.

Tabla 3: Contenido de Metales Pesados en el *Stipa Ichu*

Muestra	Metales Analizados					
	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)
Stipa Ichu 1	228.34	66.56	130	2.86	0.1	0.029
Stipa Ichu 3	228.16	56.78	131	2.99	0.11	0.032
Stipa Ichu 3	228.67	59.87	130	2.96	0.12	0.031

2.1.5. **Abigail, Dextre.** Acumulación de Metales Pesados en *Senecio Rufescens* DC. en Dos Lagunas Altoandinas de las Regiones de Lima y Junín, Perú. Tesis de Pregrado – UNMSM. 2017

Con el objetivo de determinar la concentración de arsénico, cadmio, cobre y plomo en la parte aérea (tallos + hojas) y las raíces de *Senecio Rufescens*, estableció qué parte de la planta acumula más que la otra y relacionarlo con los contenidos respectivos de metales en los suelos. 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 excluyente de arsénico y plomo, potencialmente útil para estudios de fitoestabilización de suelos contaminados en la zona de estudio.

2.1.6. **Enoc, Jara.** Acumulación de Metales Pesados en *Calamagrostis Rigida* (Kunth) Trin. Ex Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum Quitense* Kunth (Haloragaceae) Evaluadas en Cuatro Humedales Altoandinos – Perú. Arnaldoa, Vol. 2. 2017

Este estudio fue realizado en las lagunas de Yanamate y Quiulacocha (región Pasco), Ticticocha y Yuracmayo (región Lima), en el centro del Perú. En las especies altoandinas *Calamagrostis rigida* y *Myriophyllum quitense*, se encontró una mayor acumulación de metales pesados en los tejidos de las raíces que en la biomasa aérea, por consiguiente, estas especies serían consideradas como fitoestabilizadoras de metales pesados. La mayor acumulación de cobre (96,43 mg kg⁻¹ MS) fue registrada en *C. rigida* de la laguna Quiulacocha. La mayor concentración de plomo (160,15 mg kg⁻¹ MS) y de zinc (597,40 mg kg⁻¹ MS) fueron obtenidos en las raíces de *C. Rigida* de la Laguna Yanamate. Además, demuestra que las concentraciones de cadmio, cobre, plomo y zinc en el agua y en los sedimentos de las lagunas evaluadas superaron ampliamente los estándares ambientales nacionales de calidad de agua.

2.2. BASE TEÓRICAS – CIENTÍFICAS

2.2.1. Fitorremediación

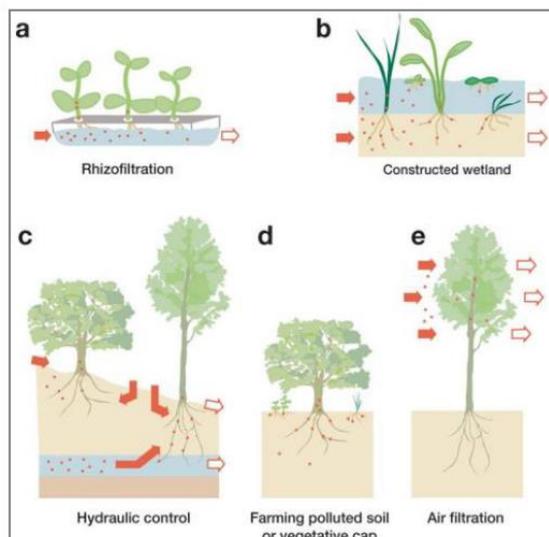
Sus orígenes datan del siglo XVIII Joseph Priestley, Karl Scheele y Antoine Lavoisier demostraron que en presencia de luz las plantas son capaces de descontaminar la atmósfera. Más tarde en 1885, Baumann, un botánico alemán, encontró altas concentraciones de zinc en las hojas de algunas plantas que

crecían en lugares conteniendo cantidades elevadas de este metal. Sin embargo, no fue hasta los años 70 que se reconoció la habilidad de las plantas para limpiar aguas y suelos contaminados. Y así, en los años 90 surgió el concepto de fitorremediación (Reinoso Torres, 2016)

Inicialmente, el término de fitorremediación se asoció al uso potencial de especies hiperacumuladoras, plantas capaces de bioconcentrar niveles inusuales de metales en sus tejidos. La mayor parte de ellas están constituidas por pequeñas plantas herbáceas que se desarrollan en zonas metalúrgicas naturales o en depósitos mineros antiguos (López Lafuente, A. 2009). Un sistema eficiente de fitorremediación requiere especies de plantas que satisfagan dos prerequisites: Tolerancia a metales y capacidad de acumulación (Absorción, detoxificación y secuestro). Además, la planta ideal debería poseer la habilidad de sobrevivir a más de un metal en el medio de crecimiento (Montano & Medina, 2014)

Las plantas y organismos de la rizosfera se pueden utilizar para la fitorremediación de diferentes maneras (Figura 2). Pueden ser utilizados en sistemas hidropónicos (a), humedales (b), el control hidráulico (c), para el suelo contaminado por la agricultura (d) y filtración aérea (e).

Figura 1: Tecnologías y usos de la fitorremediación.

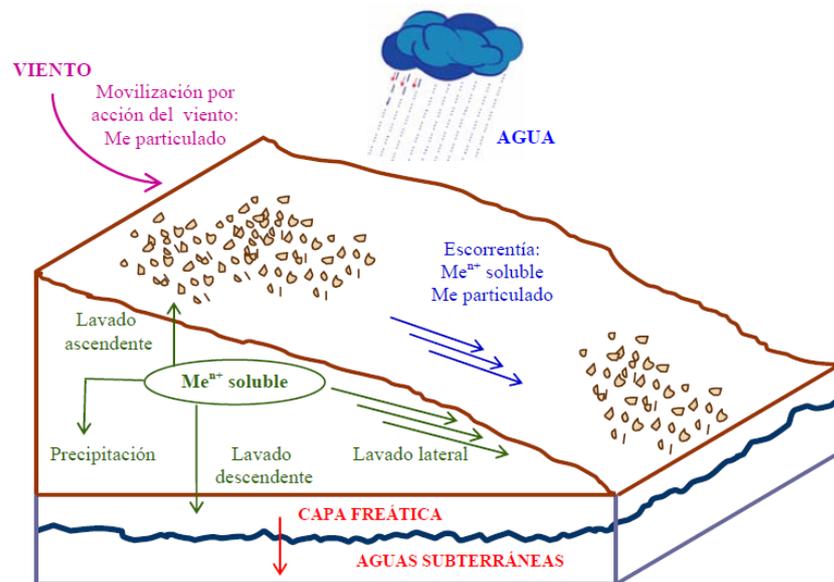


Fuente: Pilon-Smits, 2005

2.2.2. Movilización natural de los metales

Es consecuencia de la actividad biológica, de las interacciones sólido-líquido y de la acción del agua. En el caso de los residuos procedentes de la actividad minera, la movilización natural de metales puede tener lugar por la acción del viento, las precipitaciones que arrastran a las partículas por escorrentía, por lavado descendente, solubilizándose y pudiendo alcanzar hasta la capa freática y así contaminar las aguas subterráneas, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2: Movilización natural de metales pesados por acción del agua y viento.



Fuente: García, I. y Dorronsoro, C. 2005.

2.2.3. 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, Cd, Hg y 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 & Obiora, 2014)

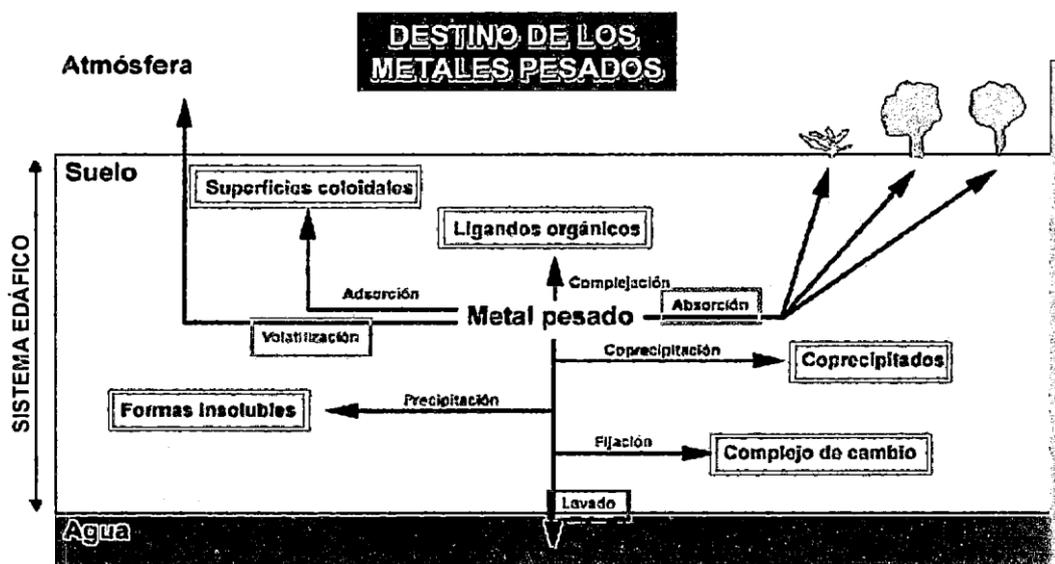
Estos elementos se encuentran en estado natural formando parte de los minerales del suelo, sin embargo, diversas actividades antropogénicas, como la extracción y procesamiento de metales en las actividades mineras generan gran cantidad de desechos que se depositan sobre la superficie del suelo y cuando 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).

2.2.4. Dinámica de los metales en el suelo

Según García y Dorronsoro (2005), los metales incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías:

- Quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Pasar a la atmósfera por volatilización.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas.
- Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

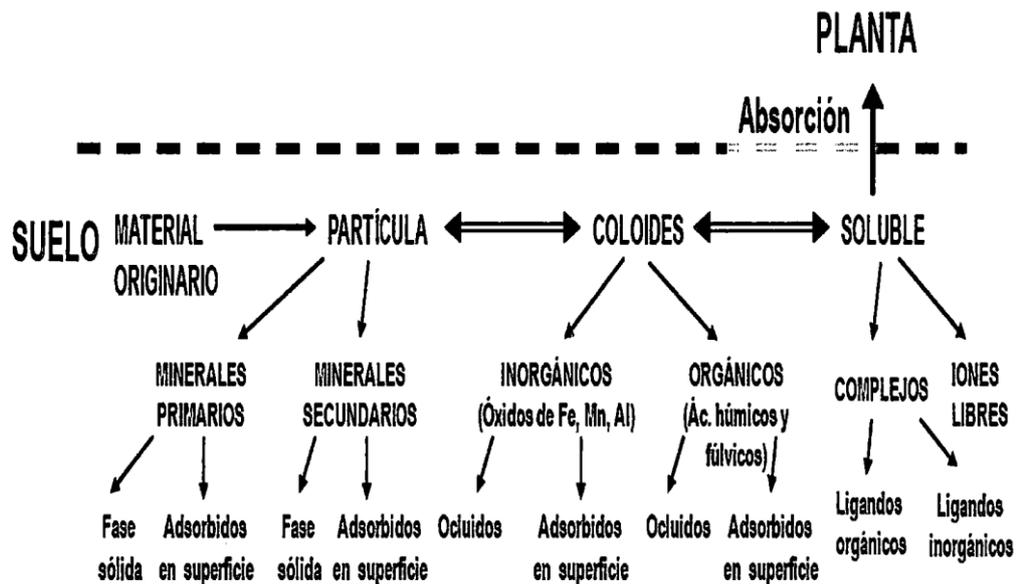
Figura 3: Dinámica de los Metales Pesados en el Suelo



Fuente: Juárez Soto H. Contaminación por metales pesados, UNA. 2006

Cuando un contaminante se incorpora al suelo se desencadena una serie de procesos físicos, químicos o biológicos que condicionan los efectos que éste puede causar no sólo sobre el sistema suelo sino también sobre el resto de compartimentos ambientales, sobre la cadena trófica y la transferencia a las plantas. Una vez incorporado el contaminante, éste puede verse influenciado por procesos tales como transformación, retención y transporte.

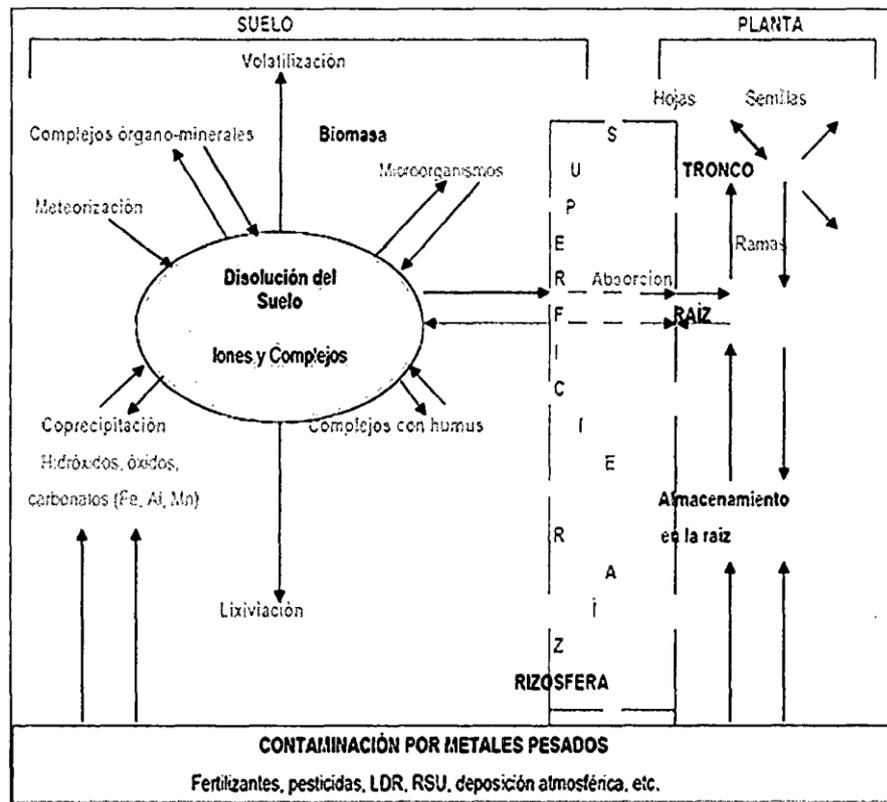
Figura 4: Factores que afectan a la concentración de elementos en el suelo.



Fuente: Menguel y Kirkby; Mecanismos y Suelos. 2001.

Los mecanismos más importantes para el control de contaminantes son: reacciones de precipitación-disolución, reacciones ácido base, reacciones oxidación-reducción, reacciones adsorción-desorción, reacciones de complejación y procesos metabólicos.

Figura 5: Dinámica de los metales pesados en el sistema suelo-planta.



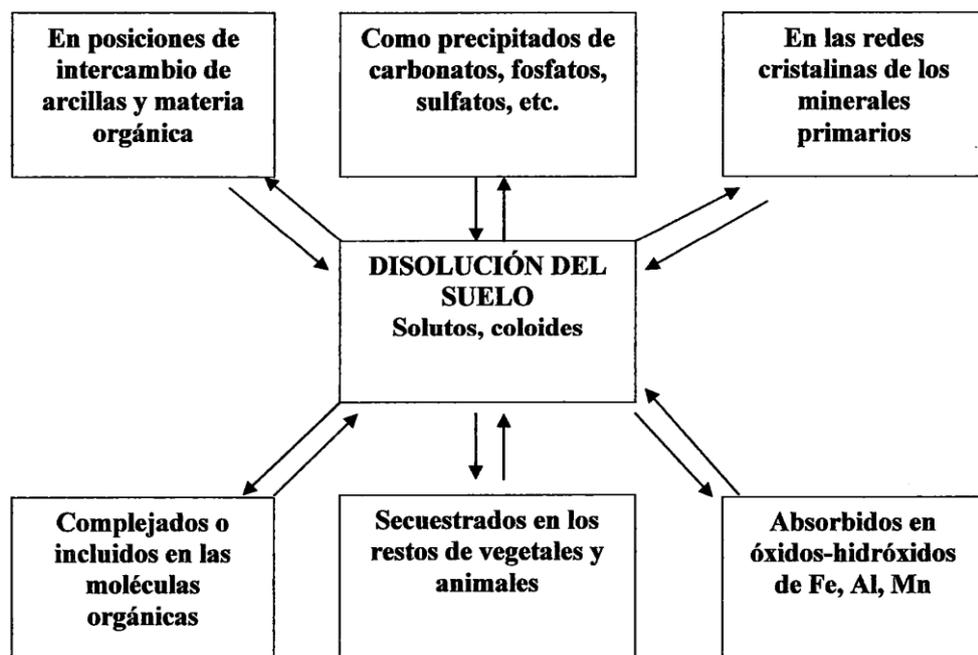
Fuente: Roca Fernández A. Centro de Investigaciones Agrarias, 2006

Los contaminantes pueden salir del suelo por: volatilización, bioasimilación, disueltos en el agua y erosión.

Los contaminantes se diluyen más o menos rápidamente en los ríos o en el aire. Sin embargo, en los suelos tienden a acumularse. Por esta razón, el suelo actúa como un sumidero de la mayor parte de los contaminantes, incluidos los metales. La toxicidad de un agente contaminante no sólo va a depender de sí mismo sino también de las características del medio donde se encuentre de manera que la sensibilidad de los suelos a la agresión que tiene lugar por parte de los agentes contaminantes va a ser muy distinta dependiendo de una serie de características edáficas. Para determinar el grado de contaminación de un suelo se hace necesario considerar la biodisponibilidad, movilidad y persistencia (Calvo de Anta, 1997).

- Por biodisponibilidad se entiende la asimilación del contaminante por los organismos, y en consecuencia la posibilidad de causar algún efecto, negativo o positivo.
- La movilidad regulará la distribución del contaminante y por tanto su posible transporte a otros sistemas.
- La persistencia regulará el periodo de actividad de la sustancia y por tanto es otra medida de su peligrosidad.

Figura 6: Compartimentalización de los metales en el suelo.



Fuente: López y Grau. 2005

2.2.5. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo

Se define como la capacidad de un elemento para pasar de un compartimento cualquiera del suelo a un ser vivo según López y Grau (2005). Esta movilidad, que se define como la aptitud de transferencia de metales entre compartimentos, está determinada por la forma, el número de cargas y la energía de retención de los metales pesados (Reid, 2001).

El metal disponible o biodisponible está compuesto por la fracción que puede ser tomada por la planta de la solución suelo, y su abundancia está fuertemente relacionada a factores físicos, químicos y biológicos (Chin, 2007).

- a. *Factores físicos:* Como la textura de suelo influyen considerablemente en la biodisponibilidad del metal, relacionados a la capacidad de enlazar y mantener en su estructura al metal.
- b. *Factores biológicos:* Según estudios se ha concluido que la acumulación de metales pesados en plantas se incrementa considerablemente cuando se asocian a bacterias fotosintéticas o micorrizas (Tseng, 2008).
- c. *Factores químicos:* Se incluye el pH del suelo y la presencia de agentes quelantes en el suelo (Chin, 2007). La solubilidad de los metales y su disponibilidad incrementa a medida que el pH del suelo disminuye (Meers, 2004-2005). En lo que respecta a la presencia de agentes quelantes en el suelo, estos pueden encontrarse en forma natural en el suelo (ácidos orgánicos de bajo peso molecular y sustancias húmicas) o ser añadidos (como el EDTA) para incrementar la especiación¹ del metal y su disponibilidad en el suelo (Shahid et al., 2012).

En definitiva, según la forma en la que se encuentre el metal retenido en el suelo, así será la disponibilidad relativa por las plantas y por tanto la incorporación en los organismos.

Tabla 4: Formas químicas de los metales en el suelo y su disponibilidad relativa para las plantas

Formas de retención en el suelo	Disponibilidad relativa
Ión en la disolución del suelo	Fácilmente disponible
Ión en complejo de intercambio orgánico o inorgánico	Disponible
Metales complejados o quelatados por compuestos orgánicos	Menos disponible

¹ Formas químicas de un mismo elemento.

Metal precipitado o coprecipitado	Disponible sólo si ocurre una alteración química
Incorporado en la matriz biológica	Disponible después de la descomposición
Metal en la estructura mineral	Disponible después de la alteración mineral

Fuente: Roca Fernández A. Centro de Investigaciones Agrarias, INGACAL.2006

2.2.6. Factores del suelo que afectan la acumulación

Los principales factores del suelo que afectan la acumulación y disponibilidad de los metales son:

2.2.6.1. *pH*

Es la medida de concentración de acidez o alcalinidad, una propiedad importante de la calidad del suelo, debido a que se encuentra correlacionado con otras propiedades del suelo, como la movilidad del catión (Wong, 2003). Además los valores del pH varía según las sales de Ca y Na, o a iones H⁺ y Al³⁺, es decir, si el valor del pH es menor a 5, los macro y micro nutrientes como el nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y boro son deficientes, aunque la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles, mientras si los valores son mayores a 6, se origina problemas de disponibilidad de fósforo, hierro, zinc, manganeso y cobre (Abad, 1993, Smith & Doran, 1996).

2.2.6.2. *Conductividad eléctrica*

Los suelos con elevada CE 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).

2.2.6.3. *Carbonatos*

La presencia de carbonatos (CaCO_3) garantiza el mantenimiento de altos valores de pH, los cuales tienden a precipitar los metales pesados (López y Grau, 2005). Sin embargo, puede resultar problemático si su concentración llega a exceder la capacidad de adsorción en el suelo formando complejos insolubles con otros elementos, ya que cantidades excesivas de calcio puede restringir la disponibilidad de fósforo, boro y hierro para las plantas.

2.2.6.4. *Materia orgánica*

Mejora la retención de agua y contribuye al aumento de los sitios de adsorción, reforzando la fase sólida del suelo (Alloway, 2013). Es el componente más importante del suelo que retiene los metales pesados pues influye significativamente en aumentar la biodisponibilidad de los mismos (IHOBE 2010). Además, su importancia se basa principalmente en la protección de la erosión, mejora la productividad de los cultivos, incrementa la temperatura edáfica, ocasionalmente adelanta la germinación de las semillas. (Almorox et al., 2010). La CIC de la materia orgánica del suelo oscila en el rango de 100 a 300 $\text{Cmol}(+)/\text{Kg}^{-1}$ dependiendo de su naturaleza y composición (Hooda, 2010).

2.2.6.5. *Capacidad de intercambio catiónico (CIC)*

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).

2.2.6.6. *Textura de suelos*

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)

2.2.6.7. *Fósforo*

Es considerado uno de los macronutrientes más importantes, para el crecimiento y desarrollo de los vegetales, las deficiencias se relacionan con su rol de transferencia y almacenaje de energía dentro de la planta, por ello las plantas forrajeras necesitan una cantidad adecuada de fósforo durante las primeras fases de crecimiento y durante la formación de las semillas. La mayor parte del fósforo absorbido del suelo se encuentra en los tejidos jóvenes, viejos y en las reservas de pectina de la semilla, que proporciona ese elemento durante su germinación. El fósforo es un elemento móvil en el suelo, es absorbida por la planta desde sus primeras fases de desarrollo (Rodríguez et al., 2000).

2.2.6.8. *Potasio*

Es un nutriente esencial para las plantas, Interviene en el equilibrio hídrico, celular, absorción y reducción de nitratos, es decir, es muy importante para las épocas de sequía, porque evita la pérdida de agua. Favorece la resistencia de enfermedades, al frío y a la salinidad y disminuye la transpiración. Participa en la síntesis de proteína y en la síntesis de glúcidos

azúcares y almidones (Calla, 2012).

2.1.1. Interpretación de Análisis de Datos

Tabla 5: Interpretación de pH

pH	Interpretación
< 5.1	Extremadamente ácido
5.2 - 6.0	Moderadamente ácido
6.1 - 6.5	Levemente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 8.4	Moderadamente alcalino
> 8.5	Extremadamente alcalino

Fuente: Horneck et al (2011)

Tabla 6: Interpretación de la conductividad eléctrica

(1:1) Extract EC (mmhos/cm*)	Calificación
0.01 - 0.45	No-salino
0.45 - 1.5	Bajo Ligeramente salino
1.51 - 2.9	Medio Moderadamente salino
2.91 - 8.5	Alto Fuertemente salino
> 8.5	Muy alto Muy fuertemente salino

Fuente: Guía de interpretación de análisis de suelos – SMART Fertilizer Management (Sela, 2015)

* mmhos/cm es equivalente a dS/m

Tabla 7: Interpretación de carbonatos (CaCO₃)

% de CaCO ₃	Interpretación
0 – 5	Muy bajo
5 – 10	Bajo
10 – 20	Normal
20 – 40	Alto
> 40	Muy alto

Fuente: (Rioja Molina, 2002), Apuntes de Fitotecnia General

Tabla 8: Interpretación del contenido de materia orgánica (M.O)

Clase	Materia Orgánica (%)
	Suelos no Volcánicos ^a
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.6 – 1.5
Medio	1.6 – 3.5
Alto	3.6 – 6.0
Muy alto	> 6.0

Fuente: Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados (Fernandez L. & Rojas A., 2006)

Tabla 9: Interpretación de la capacidad de intercambio catiónico

CIC (meq/100g)	Interpretación
< 6	Muy bajo
6 – 12	Bajo
12 – 25	Normal
25 - 40	Alto
> 40	Muy alto

Fuente: (Rioja Molina, 2002), Apuntes de Fitotecnia General

Tabla 10: Interpretación de fosforo y potasio

Interpretación	Fósforo disponible Método Olsen	Potasio disponible Método DTPA
	ppm	
Bajo	< 10	< 150
Medio	10 – 25	150 – 250
Alto	25 – 50	250 – 800
Exceso	> 50	> 800

Fuente: (Horneck, M., & Owen, 2011) - Soil Test Interpretation Guide

Tabla 11: Niveles máximos de tolerancia de los minerales en forrajes en comparación con los niveles de la dieta para el ganado doméstico, en nuestro caso ovejas.

Elementos	Nivel en el follaje de la planta	Niveles máximos de tolerancia crónica
	Niveles fitotóxicos	Ovejas
mg/Kg		
B	50 – 200 ^f	150 ⁱ

Cu	25 – 40 ^a	15 ^h 25 ^b
	20 – 30 ^c	
	10 – 70 ^d	
Fe		500 ⁱ
Mn	400 – 1000 ^f	1000 ^b 2000 ^{h y i}
	400 – 2000 ^a	
Zn	>100 ^e	300 ^{b, h y i} 1000 ^g
	300 ^c	
	100 – 400 ^f	
	500 – 1500 ^a	
Pb	30 – 300 ^{b, f y e}	30 ^b
		100 ^{h y i}
Cd	5 – 30 ^f	0.5 ^b
	5 – 700 ^a	10 ^{h y i}
Cr	5 – 30 ^f	100 ^h

(a) Chaney 1989 (b) Barceló y Poschenrieder 1992
(c) Marschner 1995 (d) Gupta y Gupta 1998
(e) Levy et al. 1999 (f) (Kabata-Pendias, 2001)
(g) Annenkov 1982 (h) U.S. NRC 2005
(i) (CMTSDWA, 2005)

Tabla 12: Interpretación de micronutrientes en el suelo

Interpretación	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	ppm*				
Deficiente	< 100	< 40	6.0	2.0	0.69
Adecuado	200	100	9.0	4.5	1.0
Alto		250	21	10	> 2.0

Fuente: YouTube, Explicación de un Análisis de Suelo (Sinclair, 2015)
* ppm equivale a mg/kg.

2.1.2. Especies acumuladoras

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). Estas plantas tienen la particularidad de tener un rápido crecimiento, elevado desarrollo de biomasa, así como gran tolerancia y capacidad de acumular metales en las partes cosechables de la planta, condiciones que definen a una planta como eficiente para la extracción

de contaminantes (Meyer y Verbruggen, 2012). Existen en la naturaleza plantas que poseen una notable adaptación a condiciones de elevada contaminación y son denominadas hiperacumuladoras (Verbruggen et al., 2013), y si bien aún no se tiene muy bien detallado los criterios para establecer a una especie como hiperacumuladora de metales se toma como base que las plantas acumulen >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 materia seca en los tallos en suelos ricos en metales pesados y metaloides y bajo condiciones naturales (van der Ent et al., 2013)

Las estrategias para hacerle frente a la elevada presencia de metales pesados en el suelo están definidas por la genética de la planta y se ven en cierto modo también influenciadas por el medio ambiente en el cual se desarrollan (Ovečka y Takáč, 2014). De este modo se han podido establecer algunas rutas generales seguidas para resistir a los metales pesados, acumulación y exclusión, que consiste en:

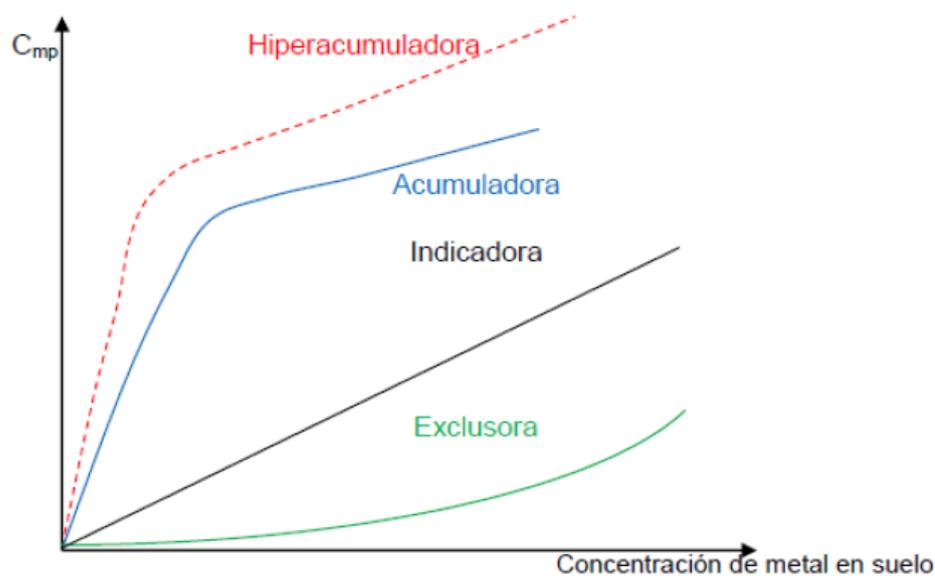
- a. *Movilización y absorción del metal*: que implica una acidificación del medio por la raíz mediante la liberación de iones H⁺, de modo que se aumenta la disponibilidad del metal, y este puede ser tomado y acumulado por la planta mediante transporte pasivo y/o activo (Chin, 2007).
- b. *Quelación en raíces*: El metal una vez dentro de la raíz sufre quelación² en el citoplasma para ser almacenado en las vacuolas, para su posterior translocación a las zonas aéreas de la planta (Rascio y Navari-Izzo, 2011).

² Formación de complejo

- c. *Translocación raíz – tallo*: se realiza vía el xilema de la planta hasta alcanzar el tallo y finalmente las hojas, con la ayuda de ácidos orgánicos que facilitan su transporte (Rascio y Navari-Izzo, 2011).
- d. *Secuestro y detoxificación del metal*: Se ha demostrado que en las células de las hojas, se forma especies derivadas del plomo como $PbCO_3$ u plomo orgánico, y otros compuestos como sulfatos del plomo que quedan internalizados en las vacuolas de las hojas (Schreck et al., 2012). Por otro lado, otras especies tienden a detoxificar el metal en las hojas por medio de su sistema antioxidante celular (Rascio y Navari-Izzo, 2011). La segunda forma de tolerancia a metales consiste en la segregación de sustancias que reducen la biodisponibilidad del metal, reduciendo su entrada (Maqueda, 2003).

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 fitoremediación de suelos contaminados (Bech et al., 1997; Iannacone y Alvarino, 2005; Tapia, 2007; Aliaga et al., 2009; Padilla et al., 2009; Hidalgo et al., 2010; Durán, 2010; Bech, Durán et al., 2012a; Bech et al., 2012b; García, 2012; Bobadilla et al., 2013; Argota et al., 2014; Jara Peña et al., 2014; Medina y Montano, 2014; Riffo, 2016).

Figura 7: C_{mp}: Concentración de metal en planta



Nota: Respuestas típicas de las plantas frente a la presencia de metales pesados

Fuente: P.S. Kidd et al., Ecosistemas 16 (2), 26-43, Mayo (2007)

2.1.3. Índices de valoración de tolerancia de metales

Las plantas poseen tres estrategias básicas, la exclusión, la indicación y la acumulación para crecer en suelos contaminados. La exclusión previene la entrada de metales o mantienen baja y constante la concentración de éstos en un amplio rango de concentraciones en el suelo, principalmente restringiendo la acumulación de los metales en las raíces. Por los tejidos aéreos generalmente se refleja el nivel del metal en el suelo. Finalmente, la acumulación se basa en distribuir, traslocar o enviar los metales a los diferentes órganos vegetativos o sus partes aéreas, en niveles que exceden varias veces el nivel presente en el suelo (Montano & Medina, 2014). Las plantas se clasifican como Hiperacumuladoras, si éstas son capaces de acumular y traslocar altos niveles de contaminantes en raíces, tallos y hojas. Para ello se calcularán dos parámetros, el Factor de Bioacumulación y Traslocación

Estos índices se calculan de la siguiente manera:

2.1.3.1. *Factor de Bioconcentración (FBC)*

Se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta (raíz y parte aérea) con relación a su concentración en el suelo. Para las plantas el factor de bioacumulación, se utiliza como una medida de la eficiencia de acumulación de metales en biomasa, donde valores mayores a 1 indican que las especies son potencialmente hiperacumuladoras y aquellas especies exclusoras poseen un BCF menores a 1, cuanto más menor sea este valor, mayor es su capacidad de exclusión (Montano & Medina, 2014).

$$BCF = \frac{\text{Concentración en el tejido de la Planta}}{\text{Concentración en el suelo}} \dots \text{Ecuación (1)}$$

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).

2.1.3.2. *Factor de Traslocación (FT)*

En la relación entre la concentración en el órgano de interés (tallo, hojas, flores, semillas o frutos) y la concentración en la raíz. Factores de traslocación mayores a 1 sugieren gran capacidad para transportar metales desde las raíces hasta los vástagos, explicada en su mayor parte, por eficientes sistemas de transporte de metales y, probablemente, por secuestro de metales en las vacuolas de las hojas y en el apoplasto. Las plantas hiperacumuladoras se caracterizan por una relación concentración de metal parte aérea/Concentración de metal raíz, mayor a 1. En cambio, las plantas no acumuladoras tienen una más alta concentración de metal en raíces que en las hojas y tallo (Cubillos, 2011; Medina y Montano, 2014).

Un valor del factor de traslocación mayor a 1 indica una eficiente traslocación del metal en brotes, por lo que la planta puede usarse con fines de fitoextracción. Si por el contrario, dicho valor es menor a 1, la traslocación del metal es baja, por lo que éste es retenido principalmente por la raíces y puede usarse para fitoestabilización (Montano & Medina, 2014) (Ocampo, 2016)

$$FT = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea}}{\text{Concentración de metales en la raíz}} \dots \text{Ecuación (2)}$$

- TF > 1, significa que la planta traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de hiperacumular metales en su parte aérea.
- TF < 1, significa que la planta no traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces.

2.1.3.3. *Concentración del metal en la parte aérea de la planta:*

En el caso de la concentración de los metales pesados, las plantas se consideran como hiperacumuladoras, si en su parte aérea tienen concentraciones superiores a (Montano & Medina, 2014)

- ✓ 100 mg/Kg para Cd
- ✓ 1000 mg/Kg para Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb
- ✓ 10000 mg/Kg para Zn y Mn.

2.1.4. **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 Subhuram, 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.

2.1.4.1. Fitoextracción

Denominado también fitoacumulación, consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas. La fitoacumulación se puede repetir ilimitadamente hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites considerados como aceptables, así lo indican Delgadillo et al. (2011) citando a (Kumar et al., 1995) en su trabajo de investigación Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. Para el caso de las 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). 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).

2.1.4.2. 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).

2.2.7. Marco normativo

Tabla 13: Concentración de metales pesados en suelos de acuerdo a los estándares ambientales nacional e internacional

Elementos	Uso Agrícola	Uso Comercial, Industrial, Extractivos
	mg/kg	
Cobre (Cu)	63 ^{b y d}	91 ^{b y d}
	150 ^c	500 ^c
Zinc (Zn)	200 ^b	360 ^b
	600 ^c	1500 ^c
	250 ^d	410 ^d
Plomo (Pb)	70 ^{a y d}	800 ^a
	60 ^b	150 ^b
	375 ^c	1000 ^c
		600 ^d
Cadmio (Cd)	10 ^a	22 ^{a y d}
	2 ^b	10 ^b
	3 ^c	20 ^c
	1.4 ^d	

a ECA, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú: D.S. N° 002-2017-MINAM (MINAM, 2017)

b Ley de Gestión Ambiental del Ecuador: Anexo 2. Norma de Calidad Ambiental del recurso suelos y criterios de remediación. (Ecuador, 2015)

c Ley de Gestión Ambiental del Argentina: Anexo II, Tabla 9: Niveles guía de calidad suelos (ug/g peso seco) (SRNAH, 2009)

d Valores estándar para suelos de uso agrícola e industrial. Fuente: Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, 2018)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

a. *Suelos Contaminados.* -

Aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de compuestos químicos de carácter peligroso de origen antropogénico, en concentraciones que superan los Estándares de Calidad Ambiental para Suelos y que conllevan a un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente.

b. *Suelo agrícola:*

Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas. (ECA Suelo, 2017)

c. *Metales Pesados.*-

Son aquellos elementos químicos que presentan una densidad superior a 5 g/cm³, una masa atómica mayor a la del sodio de 22,99 g/mol y número atómico superior a 20 (IUPAC, 2002).

- Cobre.- Es absorbido como ión cúprico divalente en suelos aireados (Cu+2) o como ión cuproso monovalente en suelos húmedos con poco oxígeno (Baran, 1995). Su biodisponibilidad varía según los valores de pH, de materia orgánica y arcilla. (Vega)
- Zinc .- Es absorbido por las plantas como ión divalente y hace parte de hormonas del crecimiento; actualmente está comprobada la presencia de zinc en unas ochenta enzimas vegetales (Salisbury y Ross, 1994). Groot et al. (1976) afirman que el porcentaje de zinc transportado en

forma sólida depende de las descargas de agua, en donde a mayor entrada (como en la época lluviosa mayor) aumenta el material suspendido y por lo tanto el contenido de zinc.

- Plomo.- Es un contaminante de la atmosfera, hidrosfera y la edafoesfera. A los suelos llega a partir de residuos industriales, de la minería, de la deposición atmosférica y a partir de la roca madre. El suelo puede inmovilizarlo gracia a la materia orgánica y la arcilla, pero si hay pH acido el Pb es móvil y será tomado por las plantas. El Pb entra en el cuerpo humano por ingestión directa, por inhalación de polvo o por la cadena alimentaria. En el organismo se acumula principalmente en el tejido óseo, pero también en el hígado, medula renal y eritrocitos.
- Cadmio.- La contaminación del suelo proviene de pigmentos, pinturas, baterías, PVC, aleaciones y fertilizantes químicos fosfatados. El cadmio se acumula en los horizontes superficiales de los suelos, pero puede emigrar hasta la capa freática. Su vida media es de 15 a 1.100 años suponiendo un problema a largo plazo. A bajo pH aumenta la asimilación de Cd por las plantas. Se ingieren grandes cantidades de Cd a través de alimentos, presentando entre el 3-8% de absorción en los seres humanos. Se distribuye por todo el organismo, aunque se acumula en mayor concentración en el hígado, riñón y páncreas. Sus manifestaciones son trastornos en el tracto gastrointestinal (nauseas, vómitos...) y no es capaz de atravesar la barrera placentaria eliminándose por orina y produciendo daño renal.

d. Fitorremediación:

Método donde se aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos,

compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo (García, F. P., & Sandoval, O. A. A. 2011).

e. Plantas altoandinas

Es cualquier vegetal ubicada en las alturas de la cordillera de los Andes, que taxonómicamente están agrupadas en el reino plantae y como tal constituyen un grupo monofilético eucariota conformado por plantas terrestres y las algas que se relacionan con ellas.

f. Tolerancia de las plantas hacia los metales pesados. -

La tolerancia hacia los metales pesados está representada por la habilidad de sobrevivir en un suelo que es tóxico a otras plantas, y se manifiesta mediante una interacción entre el genotipo y su ambiente (Macnair et al., 2002).

g. Suelo agrícola. -

Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas. (MINAM, 2017)

h. Factor de traslocación (FT). -

Es una medida del transporte interno de un metal e indica la relación entre la concentración acumulada en la parte aérea y la raíz de una planta (Mattina, 2003).

i. Factor de bioconcentración (FBC). -

Se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta con relación a su concentración en el suelo. (Audet et al., 2007)

2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

2.1.5. Hipótesis General

Las especies Altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate presentan un alto potencial fitorremediador de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio por presentar elevados contenidos metálicos en sus tejidos.

2.1.6. Hipótesis Específicos

- a. Las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos en el entorno de la laguna de Yanamate presentan condiciones favorables para el desarrollo de las especies altoandinas.
- b. Los suelos rizosféricos en el entorno de la laguna de Yanamate presentan niveles altos de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio.
- c. Los tejidos de las especies altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate presentan mayores contenidos metálicos en sus tejidos radicales.
- d. Las especies Altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate son fitoestabilizadores de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio según su FBC y de FT.

2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

2.1.7. Variable Independiente (X)

X = Contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las Especies Altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate.

2.1.8. Variables Dependientes (Y)

Y = Potencial fitorremediador en cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio.

2.1.9. Variables Intervinientes

- Factores meteorológicos.

2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES

Variable Independiente

V.I El contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en microgramos por kilogramo de materia seca (mg/kg MS) en las Especies Altoandinas *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* en el entorno de la laguna de Yanamate.

Indicadores: Resultados de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en mg/kg MS, síntomas de toxicidad en las hojas.

Variable Dependiente

V.D: Capacidad de las especies altoandinas para fitoacumular, fitoestabilizar o excluir metales pesados.

Indicadores: Altos contenidos metálicos en los tejidos vegetales de las especies altoandinas.

Variable Interviniente

- Precipitación, velocidad y dirección del viento, evaporación, infiltración, etc.

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Investigación es de enfoque cuantitativo porque los datos fueron producto del análisis físico-químico del suelo y de las especies altoandinas y sometidos estadísticamente, además es descriptivo-explicativo, ya que se cuantificó las propiedades del suelo y se investigó los fenómenos presentados.

3.2. METODOS DE INVESTIGACIÓN

A efectos abordare todos los factores que intervienen en el problema planteado, se empleó métodos: Inductivo-deductivo, análisis, síntesis y el estadístico.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Diseño No experimental - Correlacional, consiste en una técnica que ayuda a los investigadores a establecer una relación entre dos variables estrechamente relacionados.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

a. *Población.* – Siete (07) especies altoandinas con potencial remediador ubicados en el entorno de la Laguna de Yanamate, ubicado en el Distrito de Tinyahuarco, Provincia y Región Pasco, detallados a continuación:

- *Calamagrostis rigida*
- *Calamagrostis nitidula*
- *Calamagrostis vicunarum*
- *Poa calycina*
- *Poa serpaiana*
- *Trisetum spicatum*
- *Senecio rufescens.*

b. *Muestra.* –

Está representada por tres especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*, para lo cual se recolectó en total (09) muestras puntuales, (03) muestras por especie, definida por raíces, parte aérea y suelo rizosférico.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

- Observación:** Técnica de visualización en campo, para conocer los impactos ambientales producidos en los suelos e identificar la flora existente (especies altoandinas) en alrededor de la laguna.
 - ✓ Cámara fotográfica y/o de video
- Recolección de Datos:** Consiste en la recolección de información en campo (presencia de flora y fauna silvestre, características de los suelos, etc.)
 - ✓ Cuaderno de campo y lapicero

- **Monitoreo:** Recolección de muestras en campo, conformado por suelos rizosféricos, raíces, hojas y tallos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*.
 - ✓ Kit de muestreo de suelos (guantes, picota, espátula, GPS o aplicación de GPS, cámara fotográfica, etc)
- **Análisis de muestras:** El total de muestras fueron enviadas y analizadas en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), de la Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM en la ciudad de Lima.
- **Procesamiento y análisis de datos:** Se realizó con el software SPSS Statistics, versión 22 y MS Excel, versión 2016.

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Las técnicas de procesamiento y análisis de datos se seleccionaron teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Planteamiento de problemas
- La metodología de la Investigación (Recolección de datos, observación, monitoreo y análisis)

Se siguió el siguiente orden:

- Observación estructurada
- Registro de datos
- Recolección de muestras y envío
- Recepción, análisis e interpretación de resultados.

3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Los análisis de datos se llevaron a cabo con el programa SPSS, versión 22 y MS Excel, versión 2016. En primer lugar, se efectuó el análisis de las propiedades físico-químicas y contenidos metálicos (*Cu*, *Fe*, *Zn*, *Pb*, *Cd*) en los suelos rizosféricos. Luego, se analizó la normalidad de los contenidos metálicos

(*Cu, Fe, Zn, Pb, Cd*) en los tejidos vegetales, así como los cálculos del FBC y FT obtenidos para cada metal.

La capacidad de acumulación de contenidos metálicos se analizó en función a los tejidos vegetales y a la concentración natural de metales en los suelos rizosféricos, así como por el cálculo de índices de acumulación (BCF y TF). Para cada análisis se procedió a elaborar gráficos y tablas para una mejor la comprensión sobre el tema de investigación abordado.

3.8. SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Los instrumentos utilizados pertenecen a los resultados de análisis en laboratorio de la UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA – UNALM, de nueve muestras compuestas extraídas del entorno de la Laguna de Yanamate.

Según la opinión de los expertos tiene validez en su contenido, criterio y construcción, dando un promedio de valoración aceptable, en coherencia, indicadores y confiabilidad.

3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA

Este trabajo de investigación desarrollado con responsabilidad e interés por plantear soluciones rentables y amigables con el ambiente para la recuperación de nuestra laguna de Yanamate, tiene el propósito ético de apoyar a las comunidades aledañas controlando y/o reduciendo el nivel de contaminación de los suelos, con ello la exposición a los contaminantes tanto de ellos como de sus ganados, haciendo uso de especies nativas adaptadas al clima altoandino.

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO

4.1.1. Descripción del Área de Estudio

El área de estudio comprende la Laguna de Yanamate, ubicado en el Distrito de Tinyahuarco, Provincia y Región Pasco. Yace en una región montañosa de roca caliza y se extiende hacia el Sureste desde Cerro de Pasco hacia el lago Junín, tiene una longitud aproximada de 2.7 km y 0.5 a 1.0 km de ancho. El área superficial de la laguna es de aproximadamente 2.6 km² con elevación superficial de 4,358.4 msnm.

Figura 8: Ubicación de la Laguna de Yanamate.



4.1.1.1. *Características Físicas de los Suelos:*

Durante los recorridos realizados se pudo notar evidente erosión de los suelos, depósitos de esponjas mineralizadas, además de diversidad de piedras suelos mineralizados como:

- Rocas kársticas con un color de tono amarillo producto reacciones químicas con los ácidos.
- Suelos oxidados producto del exceso de Hierro (Fe)
- Sedimentos mineralizados producto de la reacción de las aguas acidas y rocas carbonatada
- Rocas altamente sulfurosas, producto de sedimentos mineralizados.

Fotografía 1: Rocas calizas altamente mineralizadas.



4.1.1.2. *Características Biológicas:*

A. Flora

Se observó amplias zonas de suelo descubierto (erosionados) y con poca presencia de vegetación. Identificamos que las especies más abundantes son el *Senecio rufescens* y *Calamagrostis rigida*,

expandidos alrededor de la laguna, a diferencia del *Trisetum spicatum*, solamente se desarrolla en la zona muestreada. A diferencia de las otras especies identificados, se evidencia que sólo las tres especies seleccionadas para nuestro estudio se desarrollan en zonas con evidencia de mayor contaminación.

Fotografía 2: Escaza vegetación producto del suelo ácido.



B. Fauna: Se pudo evidenciar que a pesar el cerco de alambrado colocado por la empresa minera, los ovinos y alpacas logran ingresar y consumir los pastos contaminados por la deposición de partículas en suspensión, generando una posible contaminación en cadena, lo cual traería consigo que las personas que consumen estas carnes también sean expuestas a los efectos de la contaminación, por deposición de los metales en el organismo.

Fotografía 3: Ganadería local (Alpacas y ovejas)



4.1.2. Especies Altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*.

Se han estudiado individuos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* y el suelo asociado a sus raíces (suelo rizosférico). Los ejemplares de estas especies fueron colectados en el entorno de la Laguna de Yanamate.

***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.

Fotografía 4: Porte del *Senecio rufescens* DC en el entorno de la Laguna de Yanamate, Pasco.





***Trisetum spicatum* (L.) K. Richt.**

Conocido comúnmente como “avena estrecha”, es una especie de planta herbácea perteneciente a la familia de las Poaceae, se encuentra en pastizales alpinos entre 3650 a 4890 m.s.n.m. Crece en forma de hierba, con presencia en suelos crioturbados y vegetación asociada al paramo.

Tienen tallos que alcanzan un tamaño de 25-90 cm, glabros a pilosos abajo de los nudos, simples. Vainas glabras a pilosas; lígula de 1.2-2.5 mm; láminas 1-4 mm de ancho, aplanadas a algo involutas, glabras a pilosas. Panícula 6-15 x 1-1.5 cm, espiciforme, recta y densa; eje densamente piloso, ocultado por las espiguillas; ramas adpresas. Espiguillas 4-7.5 mm.

Fotografía 5: Porte del *Trisetum spicatum* en el entorno de la laguna de Yanamate, Pasco.



Calamagrostis rigida (Kunth) Trin. ex Steud.

Conocido comúnmente como “Ichu”, es una especie herbácea de la familia poácea distribuida en las regiones de Ancash, Cuzco, Huánuco, Huancavelica, Junín, Lima, Puno (Brako & Zarucchi, 1993). Roque y Ramírez (2008) señalaron que esta especie fue registrada en la laguna de Parinacochas (Ayacucho) y alrededores y está asociada a la vegetación de matorrales, pajonal con arbustos y es un componente de vegetación de pajonal de pampa. Asimismo, (Cano, y otros, 2010) en el trabajo realizado de flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en la Cordillera Blanca de Ancash señalan que *C. rigida* fue registrada como integrante de la vegetación asociada de páramo y de roquedales húmedos.

Fotografía 6: Porte del *Calamagrostis rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate, Pasco.



4.1.3. Selección de las Estaciones de Muestreo

El trabajo de campo se realizó a finales de la temporada de lluvias del año 2019 (segunda semana de Mayo). Se hicieron recorridos por el entorno de la Laguna de Yanamate, diferenciando a simple vista las unidades vegetacionales representativas de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*. Las estaciones de muestreo fueron seleccionadas en función de la cercanía a la laguna, visible alteración de los suelos, accesibilidad del terreno y presencia de las especies. Es decir, se priorizó las áreas más accesibles cuya presencia de las especies altoandinas fue predominante, pues indicaría la capacidad que poseen para desarrollarse naturalmente en esas zonas, por lo tanto, la ubicación de las estaciones de muestreo fue realizados de un modo preferencial (Matteucci y Colma, 1982), se establecieron tres estaciones de muestreo, en posiciones topográficas similares (altitud, pendiente, orientación).

Tabla 3. 1: Ubicación de las estaciones de muestreo de las especies altoandinas en el entorno de la Laguna de Yanamate.

Coordenadas UTM 18L					
Unidad de muestreo	Código de muestra	Este	Norte	Altitud (msnm)	Descripción
P1	LY-S-SR				Suelo Rizosférico – Senecio Rufescens
	LY-TH-SR	0363762	8815280	4330	Tallos y hojas – Senecio Rufescens
	LY-R-SR				Raíces – Senecio Rufescens
P2	LY-S-TS				Suelo Rizosférico – Trisetum Spicatum
	LY-TH-TS	0363740	8815282	4331	Tallos y hojas – Trisetum Spicatum
	LY-R-TS				Raíces – Trisetum Spicatum
P3	LY-S-CR				Suelo Rizosférico – Calamagrostis Rigida
	LY-TH-CR	0363742	8815285	4333	Tallos y hojas – Calamagrostis Rigida
	LY-R-CR				Raíces – Calamagrostis Rigida

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

Siguiendo los criterios establecidos, se ubicaron tres estaciones de muestreo en el entorno de la Laguna de Yanamate. Las estaciones fueron ubicados aproximadamente a 80 m de la carretera central y a 50 m de la Laguna de Yanamate, con pendiente de terreno aprox. de 30° y cuyas características del suelo muestran una mayor alteración de las propiedades físicas - químicas en relación con otros puntos alrededor de la laguna.

Ilustración 1: Identificación de las estaciones de muestreo de las especies altoandinas en el entorno de la laguna de Yanamate.



Fotografía 7: Zona de muestreo de especies altoandinas en el entorno de la Laguna de Yanamate.



4.1.4. Diseño de Muestra

4.1.4.1. Muestreo de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis Rigida*

Cada muestra fue seleccionada a simple vista de acuerdo a dos criterios principales: visible alteración de los suelos rizosféricos y cercanía a la Laguna de Yanamate, considerando que cuanto más cerca, más alterado y contaminado. Se colectaron individuos completos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*, constituido por raíces (200 gr fresco) y hojas con tallos (350 gr fresco), teniendo especial cuidado al separar las plantas del sustrato o suelo rizosférico, es decir, en suma se colectaron seis muestras. Posteriormente, cada muestra colectada fue colocado en bolsas herméticas, etiquetados (*Figura 11*) y transportados cuidadosamente hasta el laboratorio en la ciudad de Lima para su análisis foliar.

Figura 9: Etiqueta de las muestras tomadas en el entorno de la Laguna de Yanamate.

	COD. DE LAB:.....
LUGAR DE PROCEDENCIA:.....	
PUNTO DE MUESTREO:.....	
TIPO DE MUESTRA:.....	
FECHA:.....HORA:.....	
PARAMETROS:.....	
SUPERVISOR DE CAMPO:.....	

Fotografía 8: Muestras colectados en bolsas herméticas (suelo rizosférico, raíces y parte aérea)



4.1.4.2. Muestreo de suelos rizosféricos

Se colectaron muestras de suelo que estuvieron en contacto directo con las raíces de las especies 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* y *T. spicatum* que no fueron considerados dentro de este estudio, es decir, se tomaron submuestras de las zonas radicales de 5 plantas en estas dos estaciones de muestreo (P1 y P2).



Se colectaron 1 kg de muestras compuestas en cada estación de muestreo (P1, P2 y P3), posteriormente fueron depositadas en bolsas herméticas de polietileno, etiquetadas con cuidado y posteriormente transportadas cuidadosamente para su análisis.

4.1.5. Cálculo de los Índices de Valoración de Tolerancia de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* a los Contenidos Metálicos (Cu, Fe, Zn, Pb, Cd)

Para conocer el uso potencial de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* 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 el contenido metálico objetivo (Cu, Fe, Zn, Pb, Cd) 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)

$$FT = \frac{C_{\text{Parte aérea}}}{C_{\text{Raíz}}}$$

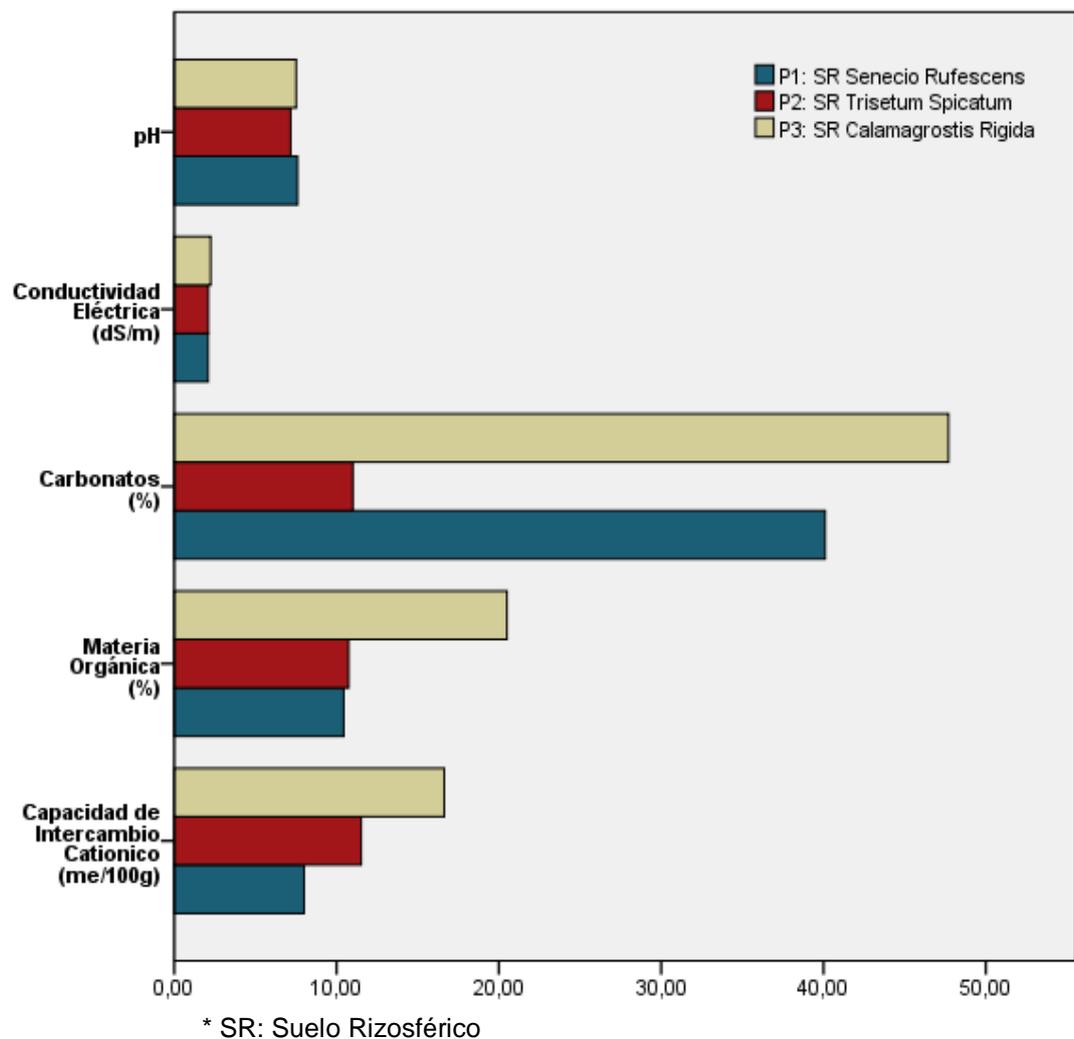
Donde $C_{\text{parte aérea}}$ es la concentración del metal objetivo (Cu, Fe, Zn, Pb, Cd) en el tejido de la parte aérea de la planta y $C_{\text{raíz}}$ es la concentración del metal respectivo en la raíz.

4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1. Principales propiedades físico-químicas del suelo

El análisis de los suelos rizosféricos superficiales (0-30 cm) en el entorno de la Laguna de Yanamate mostraron algunas diferencias entre las propiedades físico-químicas evaluadas, pese a que fueron recolectadas en una zona con características similares y cercanas una estación de la otra.

Ilustración 2: Propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos evaluados en el entorno de la Laguna de Yanamate.



El pH de los suelos rizosféricos de las especies *Senecio rufescens* (P1) y *Calamagrostis rigida* (P3) son moderadamente alcalinos (pH 7.59 y 7.50 respectivamente), mientras que del *Trisetum spicatum* (P2) son neutros (pH

7.17), según la **Tabla 5**, contrario a lo que se esperaba por ser una zona contaminada por aguas ácidas de mina.

Además, la conductividad eléctrica de los suelos rizosféricos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* (P1, P2 y P3) registraron valores medios de sales solubles (2.09, 2.10 y 2.25 dS/m respectivamente), lo que indica que son suelos moderadamente salinos según la **Tabla 6**.

Para el caso de carbonatos (CaCO_3), los suelos rizosféricos de las especies *Senecio rufescens* y *Calamagrostis rigida* (P1 y P3) muestran valores muy altos (40.10 y 47.70 % respectivamente), mientras que el *Trisetum spicatum* (P2) tiene valores normales (11.00) según lo plantea la **Tabla 7**.

En general, los suelos rizosféricos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* (P1, P2 y P3) muestran elevada cantidad de materia orgánica (10.75%, 10.43% y 20.50% respectivamente), de acuerdo a los valores estándar para suelos no volcánicos que clasifica como alto a los porcentajes de 3.6 a 6.0 según lo planteado en la **Tabla 8** 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 muy altos (Hazelton y Murphy, 2007). Por otra parte, los suelos rizosféricos del *Senecio rufescens* (P1) presentan escasa capacidad de retención de cationes totales (CIC Total), la cual se encuentra en el rango del 0-10 (Garrido, 1994), siendo 8.00 me/100g, a comparación de *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* (P2 y P3) con niveles de 11.2 y 16.64 me/100g respectivamente, los cuales son considerados normales según la **Tabla 9**.

Tabla 14: Análisis de Propiedades químicas de los suelos rizosféricos de las especies altoandinas *Calamagrostis Rigida*, *Trisetum Spicatum* y *Senecio Rufescens* evaluadas en el entorno de la Laguna de Yanamate

		Puntos de muestreo		
	unidades	P1 <i>SR Senecio rufescens</i>	P2 <i>SR Trisetum spicatum</i>	P3 <i>SR Calamagrostis rigida</i>
pH		7.59	7.17	7.50
Conductividad Eléctrica	dS/m	2.09	2.10	2.25
^aCaCO₃	%	40.10	11.00	47.70
Materia Orgánica	%	10.43	10.75	20.50
^bCIC	me/100g	8.00	11.52	16.64
Fósforo (P)	ppm	20.80	8.80	10.10
Potasio (K)	ppm	98.00	184.00	100.00

Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM
a CaCO₃: Carbonatos **b** CIC: Capacidad de Intercambio Cationico

El fósforo (P) considerado macronutriente igual que el K, en los suelos rizosféricos del *Senecio rufescens* (P1) se encuentra en valor medio (P 20.80), pero en *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* (P2 y P3) sus valores son considerados bajos (P 8.80 y 10.10 respectivamente), además, el Potasio (K) en *Senecio rufescens* y *Calamagrostis rigida* (P1 y P3) presentan valores bajos (K 98 y 100) en comparación con *Trisetum spicatum* (P2), que tiene valor medio, según el intervalo de 150 a 200 planteado en la **Tabla 10**.

El análisis de granulometría mostró que todos los suelos rizosféricos muestreados son textura moderadamente gruesa, con un porcentaje de arena mayor al 50% (**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, los cuales carecen de capacidad de

fijación y puede producirse contaminación del nivel freático (Galán H. & Romero B., 2008).

Tabla 15: Fracciones minerales (arena, limo y arcilla) de los suelos rizosféricos de *Calamagrostis Rigida*, *Trisetum Spicatum* y *Senecio Rufescens* en el entorno de la Laguna de Yanamate

Puntos de muestreo	Código	Textura			Clase textural
		Arena	Limo	Arcilla	
		%			
P1	LY-S-SR	69	17	14	Franco Arenoso
P2	LY-S-TS	57	25	18	Franco Arenoso
P3	LY-S-CR	67	21	12	Franco Arenoso

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

4.2.2. Contenidos metálicos de los Suelos Rizosféricos

Los contenidos metálicos evaluados en los suelos rizosféricos se presentan en el siguiente orden decreciente:

- *Senecio rufescens* (P1): Zn>Pb>Cu>Fe>Cd
- *Trisetum spicatum* (P2): Zn>Cu>Pb>Fe>Cd
- *Calamagrostis rigida* (P3): Zn>Pb>Fe>Cu>Cd (Tabla 16).

Para nuestra investigación no se abordó el análisis del boro (B), manganeso (Mn) ni Cromo (Cr) de los suelos rizosféricos del *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*, porque se presentan en niveles deficientes, según lo planteado en la **Tabla 12**.

Tabla 16: Contenidos metálicos en mg/kg de los suelos rizosféricos del *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.

Estaciones de muestreo	P1: SR <i>Senecio rufescens</i>	P2: SR <i>Trisetum spicatum</i>	P3: SR <i>Calamagrostis rigida</i>
Código	LY-S-SR	LY-S-TS	LY-S-CR
<i>Cu</i>	20.60	218.00	29.90
<i>Fe</i>	17.40	10.50	30.10
<i>Zn</i>	510.00	870.00	680.00
<i>Pb</i>	106.40	180.54	65.99
<i>Cd</i>	0.68	0.63	0.65

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

Se determina que los niveles de zinc superan las concentraciones de los otros contenidos metálicos analizados en todas las estaciones. Seguido por el plomo, abundantes en las estaciones P1 y P3.

El contenido de cobre resultó ser mayor en los suelos rizosféricos del *Trisetum spicatum* (P2), en comparación con los suelos rizosféricos de *Senecio rufescens* (P1) con valores de cobre y zinc menores a la del *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* (P2 y P3), plomo nivel medio y cadmio mayor que en *Senecio rufescens* y *Calamagrostis rigida* (P1 y P3). Además, los suelos rizosféricos del *Calamagrostis Rigida* tienen valores de zinc en valor medio a comparacion de *Senecio rufescens* y *Calamagrostis rigida* (P1 y P3), pero presentan los valores más bajos de plomo. En general, se presentan altos valores de Cu, Zn y Pb, lo cual era de esperarse dado que los suelos se ven afectados por las actividades mineras. Y aunque no se presenten altos valores de hierro (Fe) pese a la notoria presencia de suelos oxidados observados al momentos de realizar el muestreo, se presumen una alta absorción de este metal en el tejidos vegetales de las especies altoandinas en estudio. Lo cual indica que las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* tienen diferencias significativas al fitoacumular o

fitoestabilizar los contenidos metálicos en los suelos, ya que caso contrario estos suelos por estar ubicados en una zona con características similares y cercanas una estación con otra, presentarían niveles de contenidos metálicos similares.

Ilustración 3: Contenidos metálicos en los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.

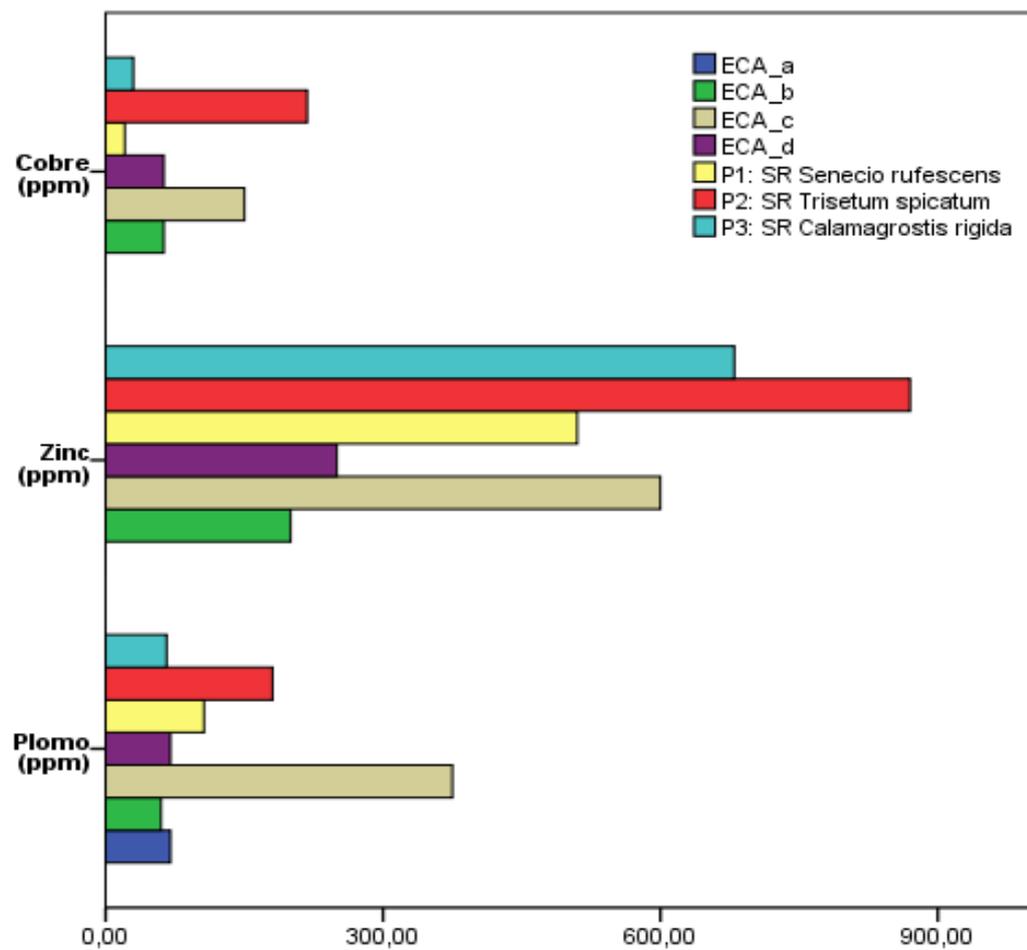
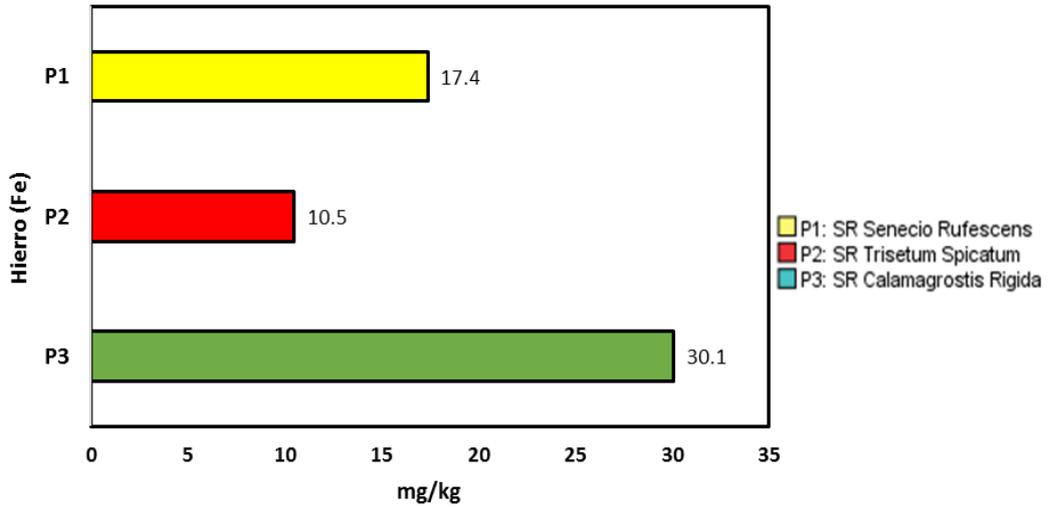
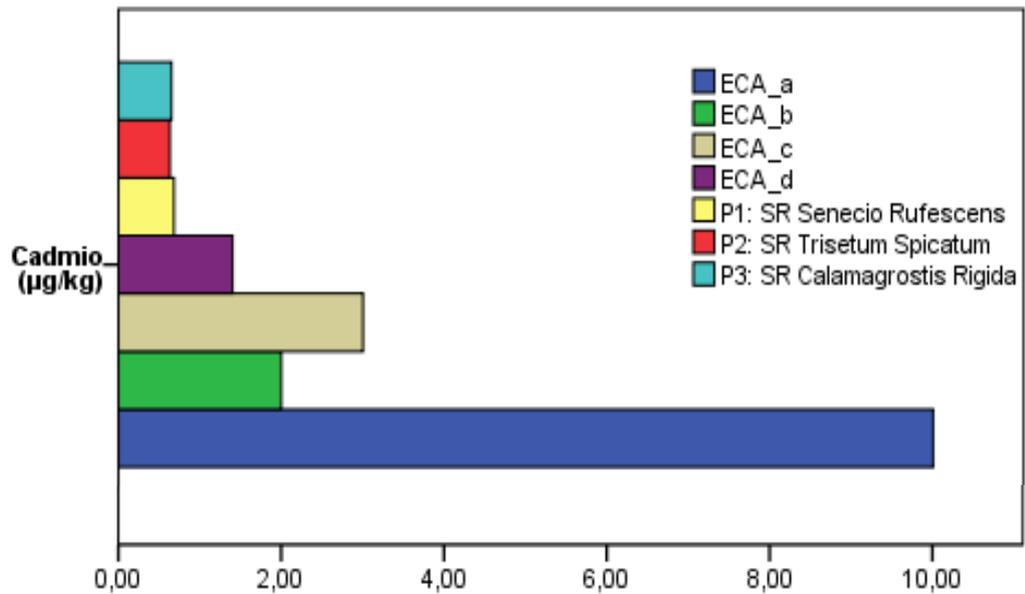


Ilustración 4: Contenido de Hierro en los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate.



Después del hierro (Fe), el cadmio resultó ser el metal más escaso en todos los puntos muestreados y sus valores fueron muy similares entre sí (0.68, 0.63 y 0.65 respectivamente; *Ilustración 5*).

Ilustración 5: Contenido de Cadmio en los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate y los valores referenciales de la legislación nacional e internacional.



Se observó que el cobre en los suelos rizosféricos del *Trisetum Spicatum* (P2) supera ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) de Suelo para

uso agrícola establecidos por Ecuador, Argentina y Canadá. De igual manera, el contenido de zinc de los suelos rizosféricos de las especies *T. spicatum* y *C. rigida* (P2 y P3) superan ampliamente los valores establecidos para los ECAs internacionales para suelos de uso agrícola (Tabla 17). Además, el contenido de Plomo en las especies *S. rufescens* y *T. spicatum* (P1 y P2) superan los ECAs establecidos por Ecuador y Canadá, aunque está dentro del umbral establecido por el ECA Canadiense, que tiene el estándar más permisivo para este elemento.

Por otro lado, el contenido de cadmio de las tres estaciones de muestreo, presentan niveles muy bajos, no constituyendo un riesgo para el desarrollo de las plantas (US EPA, 2005a, 2007, 2005c).

Tabla 17: Contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate y estándares comparativos de acuerdo a la legislación nacional e internacional para suelos de uso agrícola.

Referencia	Cobre	Hierro	Zinc	Plomo	Cadmio
P1: SR Senecior rufescens	20.60	17.40	510.00	106.40	0.68
P2: SR Trisetum spicatum	218.00	10.50	870.00	180.54	0.63
P3: SR Calamagrostis rigida	29.90	30.10	680.00	65.99	0.65
ECA^a	Ne	Ne	Ne	70	10
ECA^b	63	Ne	200	60	2
ECA^c	150	Ne	600	375	3
ECA^d	63	Ne	250	70	1.4

- Valores representan contenidos de Cu, Zn, Pb y Cd y están expresados en mg•kg⁻¹
- Ne: No establecido

a ECA, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú: D.S. N° 002-2017-MINAM (MINAM, 2017)

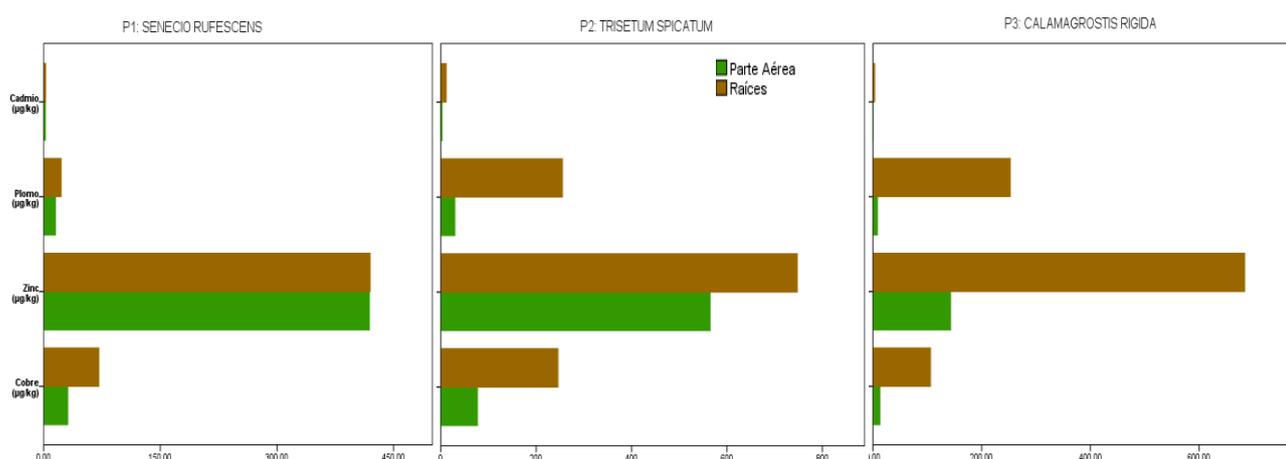
b Ley de Gestión Ambiental del Ecuador: Anexo 2. Norma de Calidad Ambiental del recurso suelos y criterios de remediación. (Ecuador, 2015)

c Ley de Gestión Ambiental del Argentina: Anexo II, Tabla 9: Niveles guía de calidad suelos (ug/g peso seco) (SRNAH, 2009)

d Valores estándar para suelos de uso agrícola e industrial. Fuente: Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, 2018)

4.2.3. Contenido de Cu, Fe, Zn, Pb y Cd en los tejidos de las especies

altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida*.



Las plantas de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate presentan la siguiente tendencia de acumulación en sus tejidos:

- **P1:** Fe>Zn>Cu>Pb>Cd
- **P2 y P3:** Fe>Zn>Pb>Cu>Cd

Resaltando, en general, que hay mayor contenido metálico de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio los tejidos radicales que en la parte aérea (*Tabla 18 al 22*), lo que hace indicar que estas especies altoandinas serían fitoestabilizadoras.

4.2.3.1. Cobre (Cu)

El contenido de cobre en los tejidos radicales de las especies altoandinas colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate resultaron ser superiores a las registradas en la parte aérea.

Tabla 18: Contenido de Cu (mg/kg MS) en los tejidos de *S. rufescens*, *T. Spicatum* y *C. Rigida* que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.

	P1		P2		P3	
	Senecio rufescens		Trisetum spicatum		Calamagrostis rigida	
	PA	R	PA	R	PA	R
Cu (µg/kg MS)	31	71	77	246	13	106

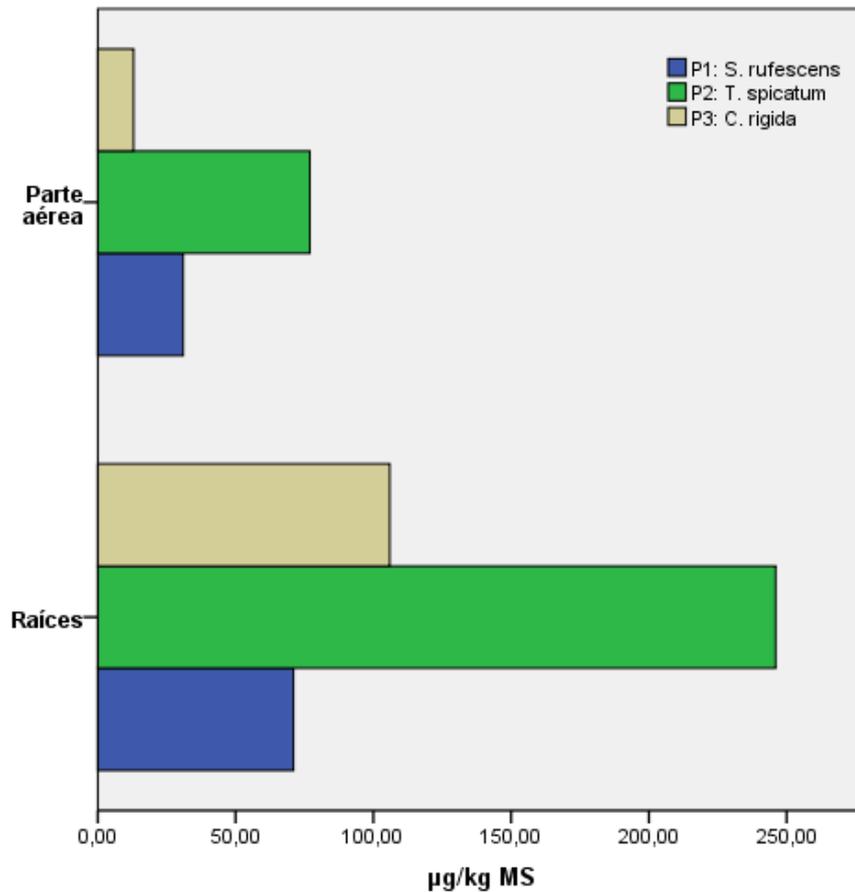
Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM
 • PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

Al comparar el contenido de cobre obtenidas en los tejidos de las especies colectadas, se observó que la especie *Trisetum Spicatum* (P2) presenta mayor contenido de cobre tanto en la parte aérea como en las raíces (77 y 246 µg/kg MS respectivamente), a comparación del *Senecio Rufescens* (P1) que contiene más cobre en su tejido aéreo, 31 µg/kg MS y *Calamagrostis rigida* (P3) en su tejido radical, 106 µg/kg MS. En general, las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* presentan altos contenidos de cobre tanto en sus tejidos aéreos como en sus raíces, lo que indica que tienen un alto potencial fitorremediador, perteneciendo a la categoría de fitoextractores o fitoestabilizadores.

Al contrastar la información de cobre en las especies altoandinas con la *Tabla 11*, Niveles en el follaje de la planta, el contenido de cobre en P1 y P2 están dentro del rango, 10 a 70 mg/kg MS, clasificado como excesivos o fitotóxicos (Gupta y Gupta 1998), dado que registran 31 y 77 mg/kg MS, respectivamente (*Tabla 18*). a excepción de *Calamagrostis Rigida* (P3), cuyo valor es 13 µg/kg MS, considerando dentro de los niveles normales (Chaney 1989). Además, en niveles máximos de tolerancia crónica para el caso de ovejas, abundante en la ganadería local de Yanamate, la especie *Trisetum Spicatum*, considerado pasto, supera el nivel máximo establecido de 25 µg/kg (Barceló y Poschenrieder 1992), considerándose toxico para el consumo de las ovejas, sin embargo, no se encontró síntomas visibles de fitotoxicidad;

mientras que el nivel presentado en *Calamagrostis Rigida* se encuentra dentro del nivel permitido. La especie *Senecio rufescens*, es un arbusto no consumible por los ganados.

Ilustración 6: Contenido de cobre en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la laguna de Yanamate.



4.2.3.2. Hierro (Fe)

El contenido de Hierro en los tejidos radicales de las especies altoandinas colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate fueron superiores a las registradas en la parte aérea (Tabla 19), además de ser el metal más abundante en comparación al cobre, zinc, plomo y cadmio.

Tabla 19: Contenido de Fe (mg/kg MS) en los tejidos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.

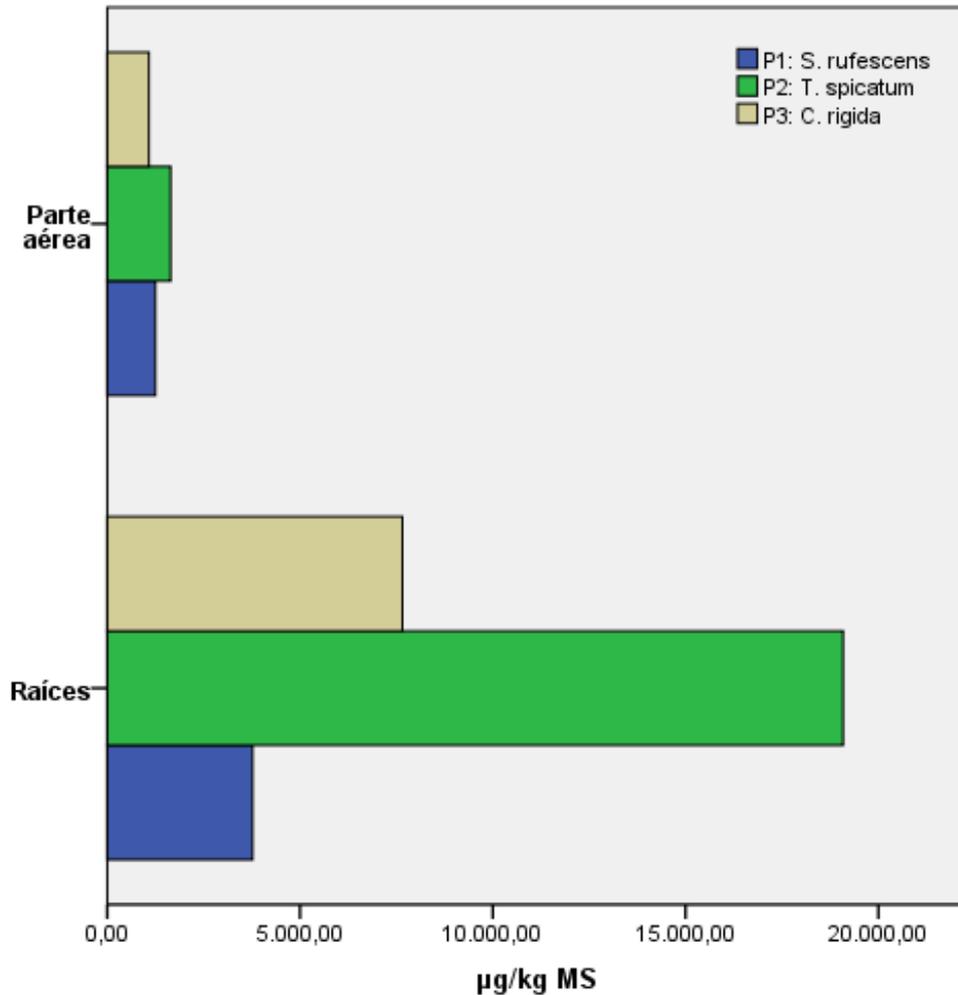
	P1		P2		P3	
	Senecio rufescens		Trisetum spicatum		Calamagrostis rigida	
	PA	R	PA	R	PA	R
Fe (µg/kg MS)	1248	3770	1645	19088	1083	7658

Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM
 • PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

Al comparar el contenido de hierro obtenidas en los tejidos de las plantas colectadas, se observaron que la especie *Trisetum Spicatum* (P2) presenta mayor contenido de hierro tanto en la parte aérea como en las raíces (1645 y 19088 µg/kg MS respectivamente), seguido por el *Calamagrostis Rigida* (P3) que contiene 7658 µg/kg MS en su tejido radicular y 3770 µg/kg MS en el *Senecio rufescens*. En general, las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* presentan altos contenidos de hierro tanto en sus tejidos aéreos como en sus raíces, lo que indica que tienen un alto potencial fitorremediador, perteneciendo a la categoría de fitoextractores o fitoestabilizadores.

Al contrastar la información del hierro encontradas en las especies altoandinas con la *Tabla 11*, niveles máximos de tolerancia crónica para el caso de ovejas, las especies altoandinas *T. spicatum* y *C. rigida* considerado pasto, consumible por los ganados, supera ampliamente el nivel máximo establecido de 500 µg/kg (CMTSDWA, 2005), considerándose toxico para el consumo de las ovejas, sin embargo, no se encontró síntomas visibles de fitotoxicidad; al igual que en la especie *Senecio rufescens*, aunque es un arbusto no consumible por los ganados.

Ilustración 7: Contenido de hierro en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la laguna de Yanamate.



4.2.3.3. Zinc (Zn)

El contenido de zinc en los tejidos radicales de las especies altoandinas colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate fueron superiores a las registradas en la parte aérea (Tabla 20).

Tabla 20: Contenido de Zn (mg/kg MS) en los tejidos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.

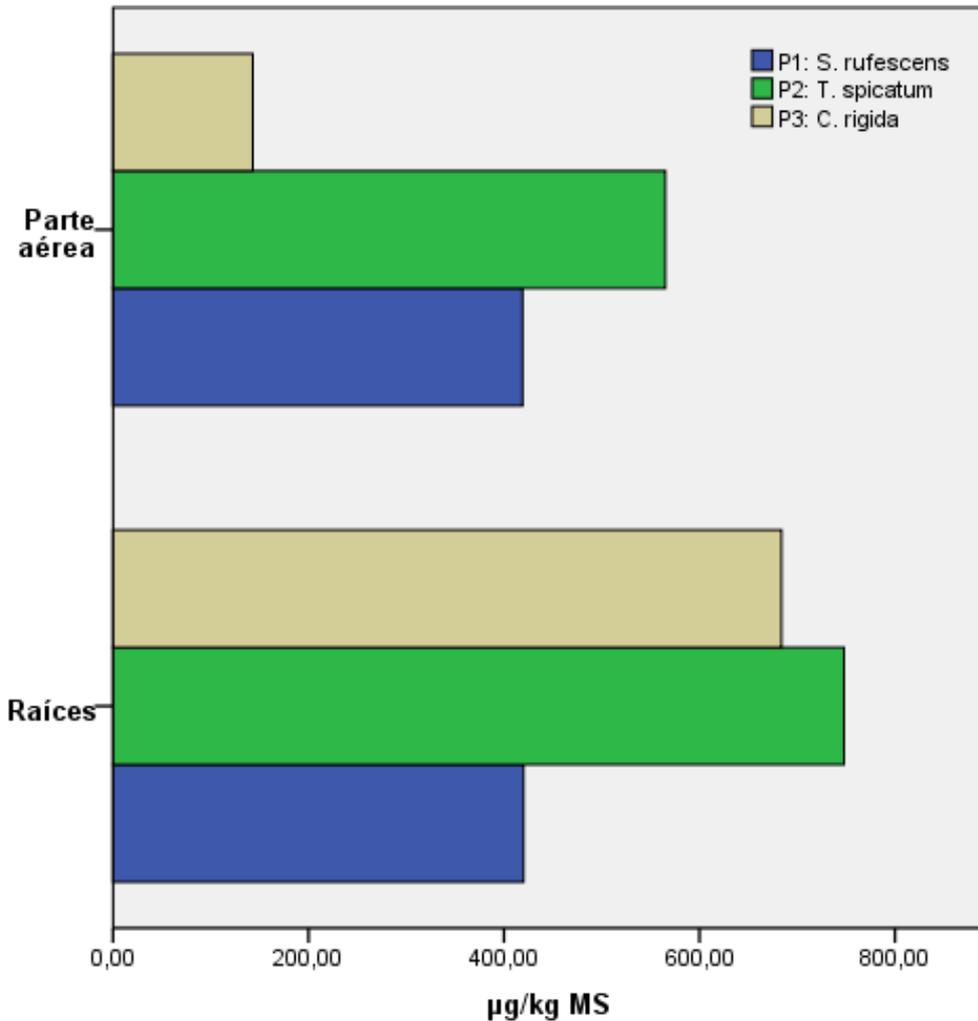
	P1 Senecio rufescens		P2 Trisetum spicatum		P3 Calamagrostis rigida	
	PA	R	PA	R	PA	R
Zn (µg/kg MS)	419	420	565	748	143	684

Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM
 • PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

La especie *Trisetum Spicatum* (P2) acumula mayor contenido de zinc tanto en la parte aérea como en las raíces (565 y 748 µg/kg MS respectivamente), seguido de *Calamagrostis Rigida* (P3) que contiene 684 µg/kg MS en su tejido radical. En general, las tres especies altoandinas presentan altos contenidos de zinc tanto en sus tejidos aéreos como en sus raíces.

Al contrastar el contenido de zinc encontradas en las especies altoandinas con la *Tabla 11*, Niveles en el follaje de la planta, las especies *S. rufescens* (P1) y *T. spicatum* (P2) superan el rango de 100-400 µg/kg MS planteado como excesivos o fitotóxicos por (Kabata-Pendias, 2001), dado que registran 419 y 565 mg/kg MS, respectivamente (*Tabla 20*), a excepción de *P3-Calamagrostis Rigida*, cuyo valor es 143 µg/kg MS, considerando dentro de los niveles normales, <300 µg/kg MS (Marschner 1995). Además, en niveles máximos de tolerancia crónica en follajes para el caso de ovejas, la especie *Trisetum Spicatum* supera el nivel establecido de 300 µg/kg (U.S. NRC 200), considerándose toxico para el consumo de las ovejas, sin embargo, no muestra síntomas visibles de fitotoxicidad; mientras que el nivel presentado en *Calamagrostis Rigida* se encuentra dentro del nivel permitido.

Ilustración 8: Contenido de zinc en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la laguna de Yanamate.



4.2.3.4. Plomo (Pb)

El contenido de plomo en los tejidos radicales de las plantas colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate fueron superiores a las registradas en la parte aérea, aún más para *T. spicatum* (P2) y *C. rigida* (P3), donde los valores en la raíz fueron 8 y 25 veces mayores al contenido registrado en la parte aérea.

Tabla 21: Contenido de Pb (mg/kg MS) en los tejidos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.

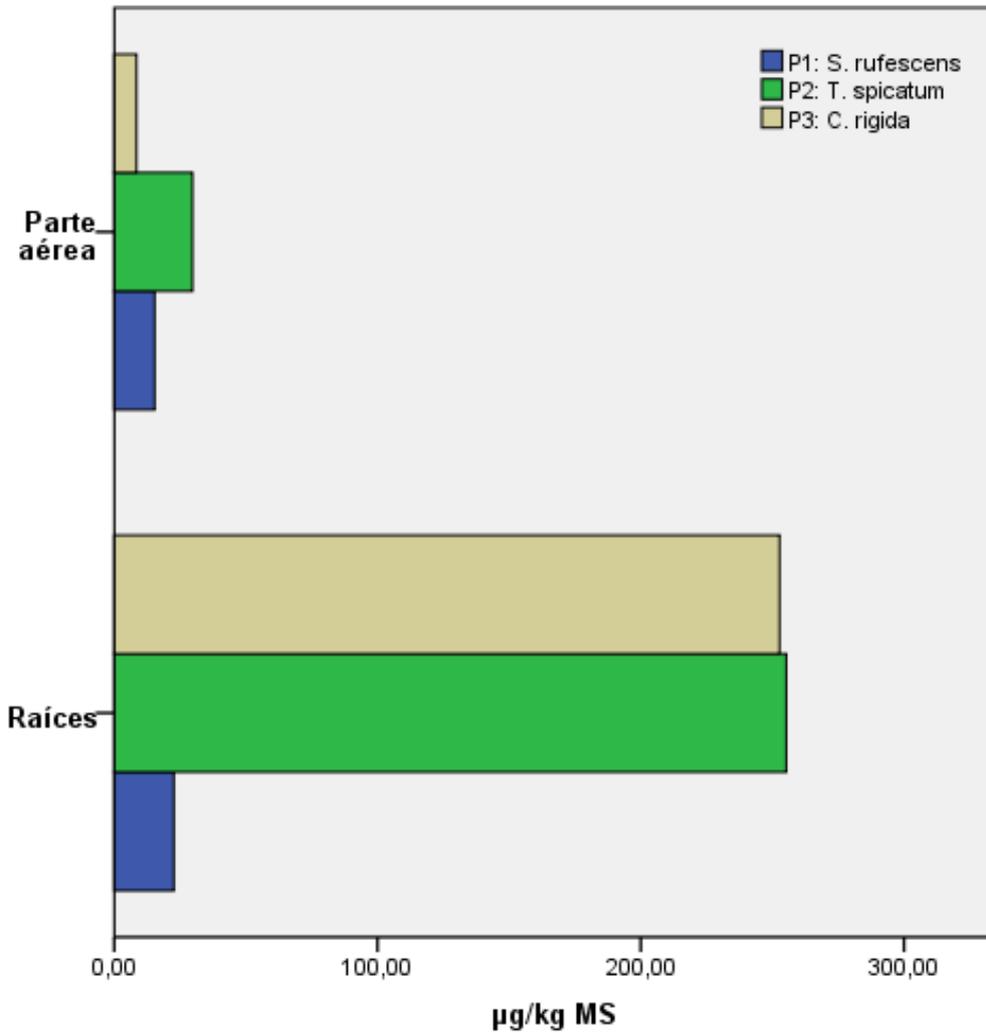
	P1		P2		P3	
	Senecio rufescens		Trisetum spicatum		Calamagrostis rigida	
	PA	R	PA	R	PA	R
Pb ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	15.40	22.60	29.75	255.25	8.48	252.75

Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM
 • PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

Al comparar el contenido de plomo obtenidas en los tejidos de las plantas colectadas, se observaron que la especie *Trisetum spicatum* (P2) presenta mayor de contenido de plomo tanto en la parte aérea como en las raíces (29 y 255.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS respectivamente), seguido de *Senecio rufescens* (P1) que contiene más plomo en su tejido aéreo, 15.40 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS y *Calamagrostis rigida* (P3) en su tejido radical, 252.75 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS. Al analizar la *Tabla 21*, determinamos que la especie *S. rufescens* no acumula ni estabiliza el plomo, ya que hay mayor contenido de plomo disponible en el suelo que en los tejidos vegetales.

Al contrastar el contenido de plomo de las especies altoandinas en estudio con la *Tabla 11*, Niveles en el follaje de la planta, el contenido de Pb en P1, P2 y P3 no superan el rango de 30-300 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS (Kabata-Pendias, 2001), para ser considerados niveles fitotóxicos. Además, en niveles máximos de tolerancia crónica en follajes para el caso de ovejas, ninguna de las especies considerados pastos superan el límite de 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS (Barceló y Poschenrieder 1992) para ser considerado toxico para el consumo de las ovejas.

Ilustración 9: Contenido de plomo en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la laguna de Yanamate.



4.2.3.5. Cadmio (Cd)

En general, el contenido de cadmio en los tejidos radicales de las especies altoandinas colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate fueron superiores a las registradas en la parte aérea.

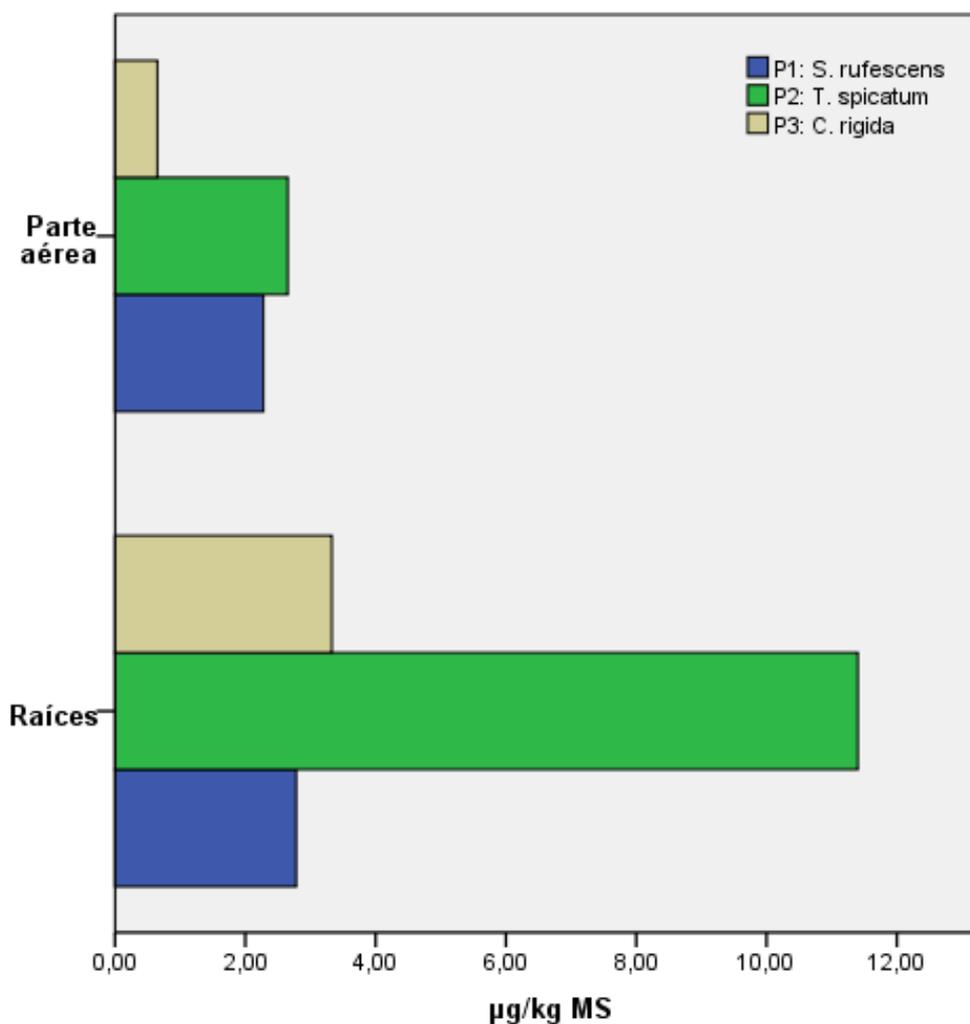
Tabla 22: Contenido de Cd (mg/kg MS) en los tejidos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* que crecen en el entorno de la Laguna de Yanamate.

	P1		P2		P3	
	Senecio rufescens		Trisetum spicatum		Calamagrostis rigida	
	PA	R	PA	R	PA	R
Cd (µg/kg MS)	2.28	2.78	2.65	11.40	0.65	3.33

Fuente: Laboratorio de Análisis Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA), UNALM
 • PA: Tejidos de la parte aérea. R: Tejidos radicales.

Las concentraciones de cadmio en las especies altoandinas mostraron los niveles más bajos registrados en los tejidos vegetales en comparación con el contenido de los demás metales. Además, la especie *Trisetum spicatum* es la que presenta mayor contenido de cadmio en su tejido aéreo y radicular, 2.65 y 11.40 µg/kg MS respectivamente, seguido por *Senecio rufescens*, que presenta contenido similar en su tejido aéreo y radical, 2.28 y 2.78 µg/kg MS. Al contrastar la información del contenido de cadmio con la *Tabla 11* - Niveles en el follaje de la planta, se determina que las especies *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* tienen niveles normales de cadmio, puesto que sus valores son bajos de acuerdo al intervalo 5-30 µg/kg MS establecido por (Kabata-Pendias, 2001), dado que registran 2.28, 2.65 y 0.65 µg/kg MS, respectivamente. Además, en niveles máximos de tolerancia crónica en follajes para el caso de ovejas, la especie *Trisetum Spicatum* supera el nivel establecido 0.5 µg/kg MS (Barceló y Poschenrieder 1992) considerándose tóxico para el consumo de las ovejas, aunque no se encontraron síntomas visibles de fitotoxicidad, hicimos la comparación con el nivel más permisivo de 10 µg/kg MS (U.S. NRC 2005) por tanto se concluye que si las ovejas del entorno de la Laguna de Yanamate consumen las especies *Trisetum spicatum* y/o *Calamagrostis rigida*, considerados pastos, el cadmio no representa riesgo de toxicidad para ellas.

Ilustración 10: Contenido de cadmio en los tejidos de *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.



4.2.4. Índices de valoración de tolerancia de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* a los contenidos metálicos

4.2.4.1. Factor de bioconcentración (FBC)

a. Cálculo del Factor de bioconcentración en los tejidos aéreos

El FBC de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* obtenidos en las estaciones de muestreo P1, P2 y P3 indican que estas especies no acumula altas

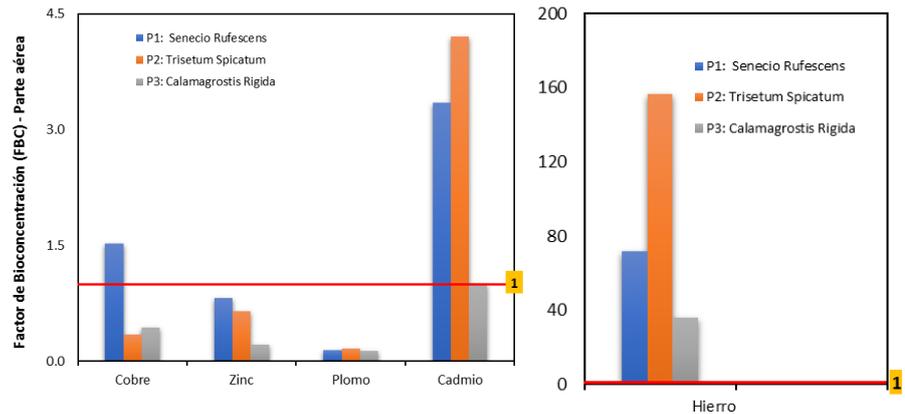
concentraciones de cobre, zinc y plomo en los tejidos aéreos en relación con los contenidos en los suelos rizosféricos asociados a ellas, dado que todos los FBC fueron menores a la unidad, a excepción del FBC de cobre obtenido en *Senecio rufescens* (P1) que obtuvo 1.52 (*Tabla 23*). En cambio, el FBC del cadmio de las especies altoandinas en estudio se muestran superior a la unidad, 3.35, 4.21 y 1.0 µg/kg MS respectivamente, lo que indica que estas especies acumulan altos contenidos de cadmio en sus tejidos aéreos en relación con los contenidos en los suelos rizosféricos asociados.

Tabla 23: Factor de Bioconcentración del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos aéreos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.

Estación de muestreo	Especie Altoandina	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd
P1	<i>Senecio rufescens</i>	1.52	71.71	0.82	0.14	3.35
P2	<i>Trisetum spicatum</i>	0.35	156.62	0.65	0.16	4.21
P3	<i>Calamagrostis rigida</i>	0.44	35.98	0.21	0.13	1.00

A partir de la *Tabla 23*, concluimos que la especie *S. rufescens* es acumulador de cobre. En general, según los cálculos del FBC muestran que las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* son acumuladoras de hierro y cadmio.

Ilustración 11: FBC del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio de los tejidos aéreos de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.



Los valores de los FBC obtenidos en cada especie altoandina de la siguiente manera:

- ✓ **P1 y P3:** Fe>Cd>Cu>Zn>Pb
- ✓ **P2:** Fe>Cd>Zn>Cu>Pb

b. Factor de Bioconcentración en los tejidos radicales

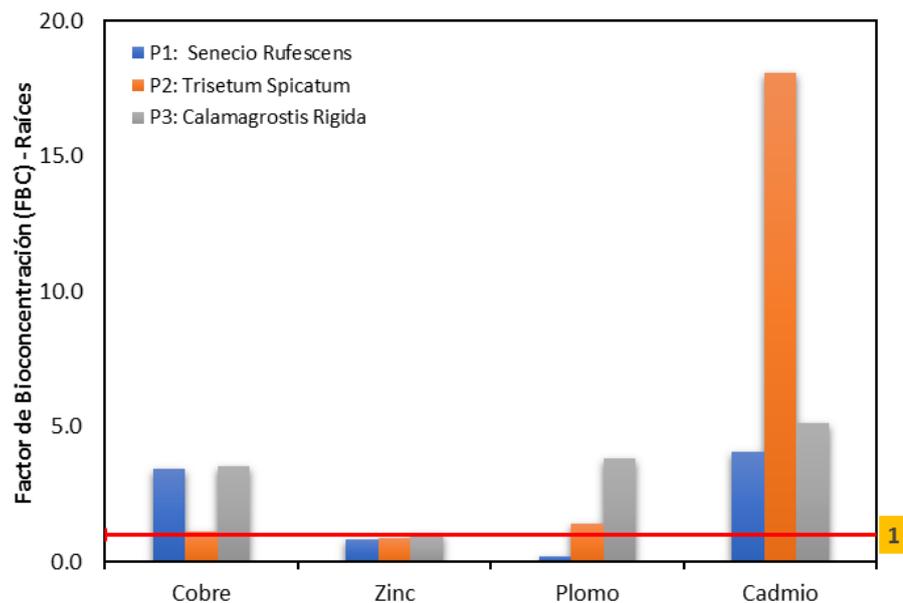
Los valores de los FBC de las especies altoandinas *S. rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* obtenidos en las estaciones de muestreo P1, P2 y P3 indican que estas especies tienen mayor contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos radicales en relación con los que contienen los suelos rizosféricos asociados a ellas y a los tejidos aéreo, dado que para *S. rufescens* (P1), el FBC de cobre, hierro y cadmio superan la unidad, 3.44, 218.67 y 4.09 respectivamente (*Ilustración 11*). En la especie *T. spicatum* (P2), el FBC de cobre, hierro, plomo y cadmio superan la unidad, 1.13, 1817.9, 1.41 y 18.10 respectivamente y en *C. rigida* (P3), los FBC en general son todos superiores a 1, 3.53, 254.4, 1.01, 3.83 y 5.12 respectivamente. Lo cual indica que estas especies son fitoestabilizadoras, es decir, son plantas que reducen la biodisponibilidad de contaminantes en el ambiente, inmovilizando los metales en el suelo mediante la retención en sus raíces (Salt et al., 1998).

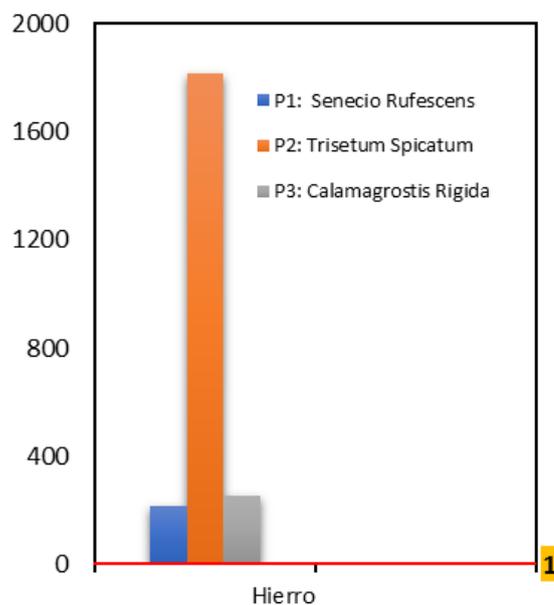
Tabla 24: Factor de Bioconcentración del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las raíces de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.

Estación de muestreo	Especie Altoandina	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd
P1	<i>SeneciorRufescens</i>	3.44	216.67	0.82	0.21	4.09
P2	<i>Trisetum spicatum</i>	1.13	1817.9	0.86	1.41	18.10
P3	<i>Calamagrostis rigida</i>	3.53	254.4	1.01	3.83	5.12

A partir de la *Tabla 24*, determinamos que las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida*, en general, son estabilizadoras de cobre, hierro y cadmio, aunque la especie *T. spicatum* y *C. rigida* estabilizan también plomo y solamente el *C. rigida* estabiliza zinc.

Ilustración 12: FBC del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos radicales de *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.





4.2.4.2. Factor de traslocación (FT)

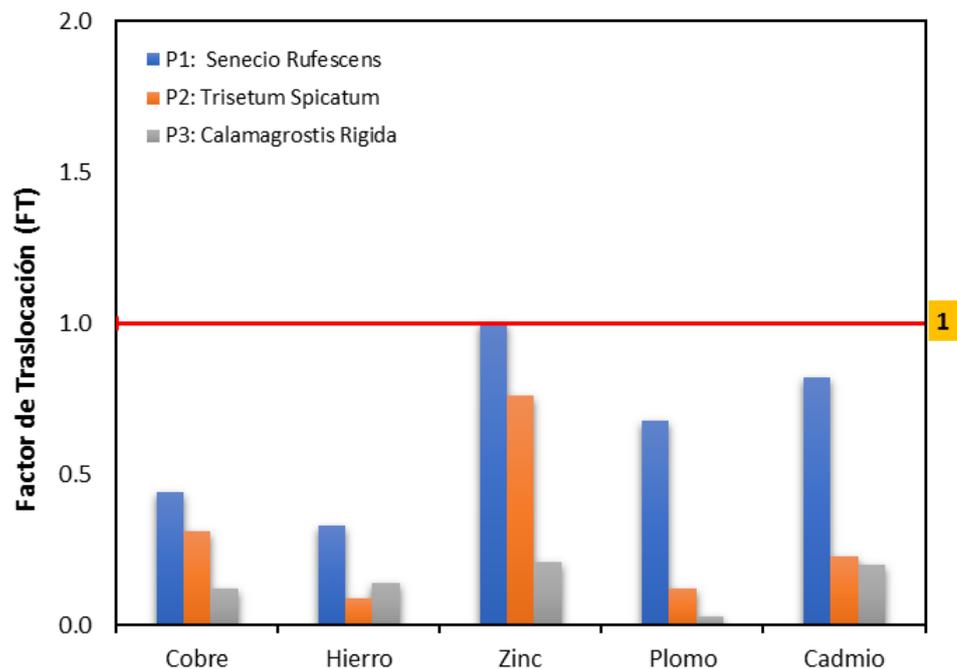
Los factores de traslocación obtenidos indican que las especies altoandinas evaluados en el entorno de la Laguna de Yanamate no son eficientes en la traslocación de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio, desde los tejidos radicales a los tejidos de la parte aérea (tallos y hojas), pues sus índices de traslocación, en su mayoría, fueron menores a la unidad (*Ilustración 13*).

Tabla 25: Factor de traslocación del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.

Estación de muestreo	Especie Altoandina	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd
P1	<i>Senecio rufescens</i>	0.44	0.33	1.00	0.68	0.82
P2	<i>Trisetum spicatum</i>	0.31	0.09	0.76	0.12	0.23
P3	<i>Calamagrostis rigida</i>	0.12	0.14	0.21	0.03	0.20

La especie *Senecio rufescens* según su factor de traslocación, transporta zinc a sus tejidos aéreos ya que su FT fue 1.0. Las especies *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* según el cálculo del factor de traslocación, no transportan significativamente ningún metal en estudio a sus tejidos aéreos, lo que indica que acumulan elevadas cantidades de Cu, Zn, Pb y Cd en sus raíces, pero no lo transfieren a los tejidos aéreos, determinándose como especies fitoestabilizadoras, más no fitoacumuladoras.

Ilustración 13: FT de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio de las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate.



4.2.5. Interpretación y presentación de resultados (resumen final)

Tabla 26: Interpretación de resultados de análisis de suelos rizosféricos de las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida*

		P1: SENECIO RUFESCENS	P2: TRISETUM SPICATUM	P3: CALAMAGROSTIS RIGIDA
Cod. muestreo		LY-S-SR	LY-S-TS	LY-S-CR
Cod. Laboratorio		4163	4162	4164
pH		Moderadamente alcalino	Neutro	Moderadamente alcalino
C.E	dS/m	Moderadamente salino	Moderadamente salino	Moderadamente salino
CaCO₃	%	Alto	Normal	Muy alto
M.O	%	Muy alto	Muy alto	Muy alto
P	ppm	Medio	Bajo	Medio
K	ppm	Bajo	Medio	Bajo
CIC	meq/100 g	Bajo	Bajo	Normal
Ca⁺²	meq/100 g	Bajo	Normal	Alto
Mg⁺²	meq/100 g	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
K⁺	meq/100 g	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Na⁺	meq/100 g	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Boro	ppm	Deficiente	Deficiente	Deficiente
Manganeso	ppm	Deficiente	Deficiente	Adecuado
Cromo	ppm	Normal	Normal	Normal
Cobre	ppm	Normal	Supera ECAs	Normal
Hierro	ppm	Deficiente	Deficiente	Deficiente
Zinc	ppm	Normal	Supera ECAs	Supera ECAs
Plomo	ppm	Supera ECAs	Supera ECAs	Normal
Cadmio	ppm	Normal	Normal	Normal

Fuente: Análisis propio

Tabla 27: Interpretación de resultados de análisis de los tejidos aéreos las especies altoandinas *S. rufescens*, *T. spicatum* y *C. rigida*

	P1: SENECIO RUFESCENS	P2: TRisetum SPICATUM	P3: CALAMAGROSTIS RIGIDA
Cod. muestreo	LY-S-SR	LY-S-TS	LY-S-CR
Cod. Laboratorio	4163	4162	4164
<i>Nivel en el follaje de la planta</i>			
Cobre	Excesivos o fitotóxicos	Excesivos o fitotóxicos	Normal
Hierro	-	-	-
Zinc	Excesivos o fitotóxicos	Excesivos o fitotóxicos	Normal
Plomo	Normal	Normal	Normal
Cadmio	Normal	Normal	Normal
<i>Niveles máximos de tolerancia crónica (Ovejas)</i>			
Cobre	Arbusto	Toxico	Normal
Hierro	Arbusto	Tóxico	Tóxico
Zinc	Arbusto	Tóxico	Normal
Plomo	Arbusto	Normal	Normal
Cadmio	Arbusto	Normal	Normal

Fuente: Análisis propio

Las especies altoandinas identificados con niveles excesivos o fitotóxicos no presentan síntomas visibles de fitotoxicidad. Además, no se ha analizado los niveles máximos de tolerancia crónica (Ovejas) en la especie *Senecio rufescens*, por ser un arbusto, no consumible por las ovejas.

Tabla 28: Factor de Bioconcentración (FBC) y de Factor de Traslocación (TF) del cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* evaluadas en el entorno de la Laguna de Yanamate.

	Suelos Rizosféricos	Parte Aérea	Raíz	FBC_Aérea	FBC_Raíz	Clasificación FBC	TF	Clasificación TF
<i>Senecio Rufescens</i>								
Cobre (Cu)	20.60	31	71	1.52	3.44	Acumuladora/Fitoestabilizadora	0.44	Fitoestabilizador
Hierro (Fe)	17.40	1248	3770	71.71	216.67	Acumuladora/Fitoestabilizadora	0.33	Fitoestabilizador
Zinc (Zn)	510.00	419	420	0.82	0.82	Exclusora	1.00	Hiperacumulador
Plomo (Pb)	106.40	15.40	22.60	0.14	0.21	Exclusora	0.68	Fitoestabilizador
Cadmio (Cd)	0.68	2.28	2.78	3.35	4.09	Acumuladora//Fitoestabilizadora	0.82	Fitoestabilizador
<i>Trisetum Spicatum</i>								
Cobre (Cu)	218.00	77	246	0.35	1.13	Exclusora//Fitoestabilizadora	0.31	Fitoestabilizador
Hierro (Fe)	10.50	1645	19088	156.62	1817.9	Acumuladora/Fitoestabilizadora	0.09	Fitoestabilizador
Zinc (Zn)	870.00	565	748	0.65	0.86	Exclusora	0.76	Fitoestabilizador
Plomo (Pb)	180.54	29.75	255.25	0.16	1.41	Exclusora//Fitoestabilizadora	0.12	Fitoestabilizador
Cadmio (Cd)	0.63	2.65	11.40	4.21	18.10	Acumuladora//Fitoestabilizadora	0.23	Fitoestabilizador
<i>Calamagrostis Rigida</i>								
Cobre (Cu)	29.90	13	106	0.44	3.53	Exclusora//Fitoestabilizadora	0.12	Fitoestabilizador
Hierro (Fe)	30.10	1083	7658	35.98	254.4	Acumuladora/Fitoestabilizadora	0.14	Fitoestabilizador
Zinc (Zn)	680.00	143	684	0.21	1.01	Exclusora//Fitoestabilizadora	0.21	Fitoestabilizador
Plomo (Pb)	65.99	8.48	252.75	0.13	3.83	Exclusora//Fitoestabilizadora	0.03	Fitoestabilizador
Cadmio (Cd)	0.65	0.65	3.33	1.00	5.12	Acumuladora//Fitoestabilizadora	0.20	Fitoestabilizador

Fuente: Análisis propio

4.3. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

A partir del análisis realizado en las Items anteriores, se acepta la hipótesis general, es decir, las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* tienen un alto potencial fitorremediador, ya que son fitoestabilizadores de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en todos los casos, lo cual es muy conveniente, por ser los suelos de la C.C. Yanamate de uso agrícola y con ello se evitaría el ingreso de estos metales a la cadena alimenticia mediante el consumo de carne ovina.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos

Se determina que, los suelos rizosféricos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* identificados como P1, P2 y P3, tienen pH = 7.59, 7.17 y 7.50 respectivamente, perteneciendo a la clasificación de moderadamente alcalino y neutro, por el alto contenido de carbonatos, ya que a mayor cantidad de CaCO_3 , el pH tiende a ser más alcalino, lo cual explica los problemas de disponibilidad de hierro, zinc, manganeso y boro, deficientes en el suelo como lo plantea (Abad, 1993, Smith & Doran, 1996), pero al comparar la información con el contenido de estos metales en la parte aérea, follajes, estos presentan niveles normales, sin problemas de deficiencia. En caso de la conductividad eléctrica, se determinan como moderadamente salinos en las tres estaciones, lo cual sustenta el desarrollo de las plantas, además de favorecer la disponibilidad de los metales. Por otra parte, el porcentaje de materia orgánica es de 10.43, 10.75 y 20.50 % respectivamente, considerados muy alto para todos los casos, pero que favorece la retención de los contenidos metálicos, puesto que influye significativamente en su biodisponibilidad, además de proteger al suelo de la erosión, mejorar la productividad del suelo e incrementar la temperatura edáfica y adelantar la

germinación de las semillas (Almorox et al., 2010), aunque la CIC se encuentre en niveles bajos en P1 y P2 y normal en P3, aporta mínimamente también a que se den mayor disponibilidad en los sitios de intercambio de los minerales del suelo para la retención de metales según (Azevedo, Ferracciú y Guimarães, 2003)

Además, el Fosforo (P), aunque se encuentra en nivel medio a bajo, es suficiente para el desarrollo y crecimiento de las especies. El Potasio (K) por su parte, como nutriente esencial de las plantas, aunque su rango determina nivel bajo a medio, se puede indicar que es suficiente por el simple hecho de que estas plantas se desarrollen, subsistan en épocas de sequía (verano) evitando la pérdida de agua, además son resistentes a enfermedades y al frío.

Además, la textura del suelo en las tres estaciones resultó ser franco arenoso, preocupante porque carecen de capacidad de fijación y generando riesgos de contaminación del nivel freático según lo afirmado por (Galán H. & Romero B., 2008).

Contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los suelos rizosféricos:

A partir de la *Tabla 16*, determinamos que el mayor contenido de Cu está en los suelos rizosféricos de la especie *Trisetum spicatum*, 218.0 mg/kg, que incluso supera el ECA internacional establecido; seguido por *Calamagrotis rigida* con 29.90 mg/kg y *Senecio rufescens* con 20.60 mg/kg. Para el caso del hierro, sus contenidos en las tres estaciones se encuentran dentro del rango considerado deficientes, <100 mg/kg, aunque no era lo esperado por la visible coloración oxidada de las muestras. También, se determina que hay mayor contenido de zinc en los suelos rizosféricos de la especie *Trisetum spicatum*, 870.00 mg/kg, seguido por *Calamagrotis rigida* con 680.00 mg/kg, ambos llegando a superar los ECAs establecidos para el estudio y *Senecio rufescens* con 510 mg/kg.

Además, el mayor contenido de plomo es el de los suelos rizosféricos de la especie *Trisetum spicatum*, 180.54 mg/kg, seguido por *Senecio rufescens* con 106.40 mg/kg, ambos superan los ECAs considerados para el análisis y *Calamagrostis rigida* con 65.99 mg/kg. Por último, para el caso del cadmio, se observa mayor contenido en los suelos rizosféricos de la especie *Senecio rufescens*, 0.68 mg/kg, seguido por *Calamagrostis rigida* con 0.65 mg/kg y *Trisetum spicatum* con 0.63 mg/kg, en general, no superan los ECAs propuestos para el análisis.

Contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos vegetales del Senecio rufescens, Trisetum spicatum y Calamagrostis rigida

El contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos radicales de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate, para todos los casos, son superiores a las registradas en la parte aérea, indicando ser exclusores y fitoestabilizadores de Cu, Fe, Zn, Pb y Cd, contrario a lo esperado. Se esperaba que las especies fueran fitoacumuladores.

La especie *Trisetum spicatum* (P2) presenta mayor contenido de cobre tanto en la parte aérea como en las raíces (77 y 246 µg/kg MS respectivamente), seguido por *C. rigida* y *T. spicatum* que acumulan en su tejido radicular 106 y 71 µg/kg MS respectivamente. El nivel de cobre en el follaje del *S. rufescens* y *T. spicatum* según (Gupta y Gupta 1998) son excesivos o fitotóxico, pero no presentan síntomas visibles de fitotoxicidad. En niveles máximos de tolerancia crónica para el caso de ovejas, la especie *Trisetum spicatum*, considerado pasto, supera el nivel máximo establecido por (Barceló y Poschenrieder 1992), considerándose tóxico para el consumo de las ovejas.

La especie *Trisetum spicatum* (P2) presenta mayor contenido de hierro en la parte aérea como en las raíces (1645 y 19088 µg/kg MS respectivamente),

seguido por el *Calamagrostis rigida* (P3) que contiene 7658 µg/kg MS en su tejido radicular y 3770 µg/kg MS en el *Senecio rufescens*. Podemos afirmar que el contenido de hierro en los tejidos tanto aéreos como radicales son los más altos en comparación a otros metales. Para el caso de niveles máximos de tolerancia crónica para ovejas, las especies *T. spicatum* y *C. rigida* considerados pastos, supera ampliamente el nivel máximo establecido de 500 µg/kg (CMTSDWA, 2005), considerándose toxico para el consumo de las ovejas, aunque tampoco presentan síntomas visibles de fitotoxicidad.

La especie *Trisetum spicatum* (P2) acumula mayor contenido de zinc en la parte aérea como en las raíces (565 y 748 µg/kg MS respectivamente), seguido de *Calamagrostis rigida* (P3) que contiene 684 µg/kg MS en su tejido radical. Las especies altoandinas en estudio presentan altos contenidos de zinc tanto en las raíces como en hojas y tallos. En Nivel de zinc en el follaje, las especies *S. rufescens* (P1) y *T. spicatum* (P2) superan el rango de 100-400 µg/kg MS planteado como excesivos o fitotóxicos (Kabata-Pendias, 2001). Además, en niveles máximos de tolerancia crónica en follajes para ovejas, la especie *Trisetum spicatum* supera el nivel establecido de 300 µg/kg (U.S. NRC 200).

La especie *Trisetum spicatum* (P2) presenta mayor contenido de plomo tanto en la parte aérea como en las raíces (29 y 255.25 µg/kg MS respectivamente), seguido del *Calamagrostis rigida* (P3) en su tejido radical, 252.75 µg/kg MS. Además, la especie *Senecio rufescens* no acumula ni estabiliza el plomo, ya que hay mayor contenido de plomo disponible en el suelo rizosférico que en los tejidos vegetales. Según los niveles en el follaje de la planta, el contenido de plomo en P1, P2 y P3 no superan el rango de 30-300 µg/kg MS (Kabata-Pendias, 2001), por tanto, no son fitotóxicos. En niveles máximos de tolerancia crónica en follajes para las ovejas, ninguna de las especies considerados pastos superan en límite de 30 µg/kg MS (Barceló y Poschenrieder 1992) para ser considerado toxico para el consumo de las ovejas.

El contenido de cadmio es bajo en comparación con los otros metales. Además, la especie *Trisetum spicatum* presenta mayor contenido de cadmio en su tejido aéreo y radicular, 2.65 y 11.40 µg/kg MS respectivamente, seguido por *Senecio rufescens*, que presenta contenido similar en su tejido aéreo y radical, 2.28 y 2.78 µg/kg MS. En niveles en el follaje de la planta, las especies *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* tienen niveles normales de cadmio (Kabata-Pendias, 2001). Además, en niveles máximos de tolerancia crónica en follajes para ovejas, la especie *Trisetum spicatum* no supera el nivel establecido 10 µg/kg MS (U.S. NRC 2005), por tanto se concluye que si las ovejas del entorno de la Laguna de Yanamate consumen las especies *Trisetum spicatum* y/o *Calamagrostis rigida*, considerados pastos, el cadmio no representa riesgo de toxicidad para ellas.

Concluimos que la especie *Trisetum spicatum* (P2) es la que más cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio acumula en sus tejidos aéreos, aunque principalmente radicales. Definiéndose con alto potencial fitorremediador en su categoría fitoestabilizador.

Índices de valoración de tolerancia de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* a los contenidos metálicos

A partir de los cálculos de FBC y FT desarrollados, determinamos que las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* son fitoestabilizadores de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio. Pero que la especie *Trisetum spicatum* es el que tiene mayor contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en su tejido radicular, definiéndose como la más promisoría a ser utilizadas por su alto potencial fitorremediador, en la categoría fitoestabilización, seguido por la especie *Calamagrostis rigida*, ambos considerados pastos, consumibles por los ganados.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* en el entorno de la Laguna de Yanamate que favorecen la subsistencia de estas especies en un suelo contaminado, son el pH neutro o ligeramente alcalino (Abad, 1993) por el alto contenido de carbonatos, el alto porcentaje de materia orgánica (Almorox et al., 2010). En caso de la CE, moderadamente salinos y la CIC en niveles bajos (Azevedo, Ferracciú y Guimarães, 2003). El contenido de Fosforo (P) y Potasio (K) ligeramente bajos a medio, pero suficientes para permitir el desarrollo de las especies altoandinas. La textura es franco arenoso, lo cual resulta preocupante por la posible contaminación del nivel freático (Galán H. & Romero B., 2008).
2. El contenido de cobre de los suelos rizosféricos de la especie *Trisetum spicatum*, 218.0 mg/kg, supera el ECA internacional establecido. Para el caso del hierro, sus contenidos en las tres estaciones se encuentran dentro del rango considerado deficientes, <100 mg/kg, inesperado por la visible coloración oxidada de las muestras. El contenido de zinc en los suelos rizosféricos de la especie *Trisetum spicatum* con 870.00 mg/kg y *Calamagrostis rigida* con 680.00 mg/kg, superan los ECAs establecidos para el análisis. Además, el contenido de plomo de los suelos rizosféricos de la especie *Trisetum spicatum*, 180.54 mg/kg, y *Senecio rufescens* con 106.40 mg/kg, superan los ECAs considerados para el análisis. El contenido de cadmio es mayor en los suelos rizosféricos de la especie *Senecio rufescens*, 0.68 mg/kg, seguido por *Calamagrostis rigida* con 0.65 mg/kg y *Trisetum spicatum* con 0.63 mg/kg, pero ninguno supera los ECAs propuestos para el análisis.
3. El contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en los tejidos radicales de las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrostis rigida* colectadas en el entorno de la Laguna de Yanamate, para todos los casos, son

superiores a las registradas en la parte aérea, definiéndose como especies altoandinas exclusores y fitoestabilizadores.

4. El contenido de cobre, hierro y zinc en los tejidos aéreos de la especie *Trisetum spicatum* presentan niveles tóxicos tanto para nivel en el follaje de la planta como para los niveles máximos de tolerancia crónica para las ovejas. En la especie *Calamagrostis rigida* solamente el hierro presenta fitotoxicidad para los niveles máximos de tolerancia crónica para las ovejas, aunque ninguna de estas especies presenta síntomas visibles de fitotoxicidad.
5. La especie altoandina *Trisetum spicatum* (P2) presenta mayor contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio acumulada principalmente en sus tejidos radicales, definiéndose con alto potencial fitorremediador en su categoría fitoestabilizador. Además, es la especie que se desarrolla en áreas donde los contenidos de estos metales son los más altos, seguido por la especie *Calamagrostis rigida*, ambos considerados pastos, consumibles por los ganados y *Senecio rufescens*.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere aplicar la fitoestabilización para remediar zonas de uso agrícola, con el fin de evitar el ingreso de metales a la cadena alimenticia, además de reducir gastos adicionales por traslado y tratamiento de los metales del follaje en caso se aplique Fitoextracción.
2. 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.
3. Las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrotis rigida* son especies adaptadas 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.
4. La propuesta de emplear a las especies altoandinas *Senecio rufescens*, *Trisetum spicatum* y *Calamagrotis rigida* en estrategias de fitoestabilización de suelos contaminados con metales pesados requieren una mejor comprensión de las habilidades de estas especies. 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 con o sin uso de enmiendas.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Abigail, D. R.** (2017). Acumulación de metales pesados en *Senecio rufescens* DC. en dos lagunas altoandinas de las regiones de Lima y Junín, Perú. UNMSM. Lima: E.A.P. de Ciencias Biológicas.
2. **Alloway, B.** (2013). *Heavy Metals in Soils* (Third edit ed.). Springer Netherlands. Environmental Pollution. doi:ISBN 978-94-007-4469-1
3. **Cano, A., Mendoza, W., Castillo, S., Morales, M., La Torre, M., & Otros.** (2010). Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. Facultad de Ciencias Biológicas . Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marco - UNMSM.
4. **Carmen, A. C.** (2013). Eficacia de la Fitoextracción para la Remediación de Suelos Contaminados en Villa de Pasco. Tesis de Posgrado, Universidad Nacional del Callao, Escuela de Posgrado, Callao.
5. **Caro-Moreno, D., & Jiménez-Cantizano, F.** (2013). Estudio de la concentración de elementos traza tóxicos de los depósitos de lodos, los suelos y las plantas en Mina La Solana, Almería (España). Sevilla, España: A E E T ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ECOLOGÍA TERRESTRE.
6. **Ccapa C., B.** (2014). Criterios de Estudios de Suelos para Zonas Altoandinas. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa.
7. **CCME, C. C.** (2018). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*.
8. **Chibuike, G. U., & Obiora, S. C.** (2014). *Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods*. Department of Soil Science, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria. Yongchao Liang.
9. **CMTSDWA, C. o.** (2005). *Mineral Tolerance of Animal*. Second revised edition.
10. **Denga, H., Ye, Z., & Wong, M.** (2004). Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China (Vol. 132). *Environmental pollution*. doi:10.1016/j.envpol.2004.03.030
11. **Ecuador, M. d.** (2015). Anexo 2. Norma de Calidad Ambiental del recurso suelos y criterios de remediación. pág. 35.

12. **Enoc, J.-P.** (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados. *Revista Peruana de Biología*(145-154), 145-154.
13. **Enoc, J.-P., C., J. G., Haydeé, M., Tito, S., Liliana, T., Tito, S., & Liliana, T.** (2017). Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rigida* (Kunth) Trin. ex Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum quitense* Kunth (Haloragaceae) evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*, 2(583 - 598). doi:<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24210>
14. **Fernandez L., L., & Rojas A., N.** (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano de Petroleo.
15. **Francisco, G., Edgar, Y., Jean, B., Diber, S., & Carlos, L.** (2015). Informe de Evaluación Ambiental de la cuenca del río San Juan, 2015. OEFA, Lima.
16. **Galán H., E., & Romero B., A.** (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macia: Revista de la sociedad española de mineralogía*.
17. **Garrido V., 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.
18. **Golder Associates Perú, S.** (2000). Informe Final - FASE 1: Plan de Manejo Ambiental de la Laguna Yanamate. Resumen Ejecutivo, Volcan Compañía Minera S.A.A., Lima.
19. **Gutiérrez P., H., & Castañeda S., R.** (2017). Catálogo de las Gramíneas (Poaceae) de Huancavelica, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, Departamento Académico de Biología, Lima. doi:<http://dx.doi.org/10.21704/rea.v16i1.905>
20. **Hazrat, A., Ezzat, K., & Muhammad, A.** (2013). Phytoremediation of heavy metal. Concepts and applications. EL SERVIER.
21. **Hernández Sampieri, R.** (2013). Metodología de la Investigación. México: Editorial McGraw Hill.
22. **Horneck, D. A., M., S. D., & Owen, J. S.** (2011). Soil Test Interpretation Guide. (O. S. University, Ed.)

23. **Jaime N., T. L.** (1999). Planta Agua de Mina LIX-SX-EW. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
24. **Javier, P. M.** (2015). Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. ECIPerú, 11(2), 42-46.
25. **July, P. S.** (2016). Tratamiento de la Contaminación de los Suelos de la Laguna Yanamate Empleando la Tecnología de la Fitorremediación. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco.
26. **Kabata-Pendias, A.** (2001). Trace Elements in Soils and Plants (Third edition ed.). Florida, USA: CRC Press.
27. **Luciana, C. R.** (2014). Fitorremediación con Especies Nativas en Suelos Contaminados por Plomo. Tesis de Pregrado, UNALM, Facultad de Ciencias, Lima.
28. **MINAM.** (2017). ECA, Estándares de Calidad Ambiental para Suelos del Perú. El Peruano, pág. 14.
29. **MINAM,** (. d. (2015). Guía para el Muestreo de Suelos. Lima.
30. **Montano, Y., & Medina, K.** (2014). Determinación del Factor de Bioconcentración y Traslocación de Metales Pesados en el *Juncus Arcticus* willd. y *Cortaderia Rudiuscula* stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza - Ancash - 2013. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional "Santiago Antunez de Mayolo", Huaraz.
31. **Ñáñez, D.** (2016). Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú). Lima: Universidad Peruana Cayetano Heredia.
32. **Ocampo, P.** (2016). Transferencia de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn desde suelos a plantas en la comuna de Talcahuano, Chile. Tesis de Pregrado, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
33. **Reinoso Torres, D.** (2016). Evaluación de cepas bacterianas resistentes a metales pesados. Bachelor's thesis.

34. **Rioja Molina, A. E.** (2002). Apuntes de Fitotecnia General. Ciudad Real: E.U.I.T.A.
35. **Sela, G.** (2015). Guía de interpretación de análisis de suelos. Obtenido de SMART Fertilizer Management.
36. **Sinclair, J.** (Dirección). (2015). Explicación de un Análisis de Suelo [Película]. USA.
37. **SRNAH, S. d.** (2009). Ley de Gestión Ambiental del Argentina: Tabla II - Anexo 9: Niveles guía de calidad suelos (ug/g peso seco).
38. **Van Der Ent, A. B.** (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloids: Facts and fiction. *Plant and Soil* (1-2 ed., Vol. 362). doi:10.1007/s11104-012-1287-3
39. **Vega, N. B.** (s.f.). Metales pesados en suelos y sus efectos sobre la salud. Universidad Complutense.
40. **Vladimir A., L. M.** (2017). Capacidad fitoremediadora de especies Altoandinas para suelos contaminados por metales pesados procedentes de la Compañía Minera Lincuna S.A.C, en condiciones de invernadero 2015-2016. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Ancash, Huaraz.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: “EVALUACIÓN DE CONTENIDOS METÁLICOS EN LAS ESPECIES ALTOANDINAS *Calamagrostis rigida*, *Trisetum spicatum* y *Senecio rufescens* EN EL ENTORNO DE LA LAGUNA DE YANAMATE, PARA DETERMINAR SU POTENCIAL FITORREMIADOR - PASCO - 2019”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
<p>GENERAL:</p> <p>¿Qué potencial fitorremediador de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio presentan las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate al ser evaluadas?</p> <p>ESPECIFICOS:</p> <p>a. ¿Existen alteraciones en las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate?</p> <p>b. ¿Hay contaminación por la presencia de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en µg/kg MS en los suelos rizosféricos del entorno de la Laguna de Yanamate?</p> <p>c. ¿En qué parte de sus tejidos, radicales o aéreos, las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> del entorno de la Laguna de Yanamate presentan mayor contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en µg/kg MS?</p> <p>d. ¿Las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate son fitoacumuladores o fitoestabilizadores según los cálculos de Factor de Bioconcentración (FBC) y de Traslocación (FT) de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio?</p>	<p>GENERAL:</p> <p>Evaluar los contenidos metálicos en los tejidos de las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate para determinar su potencial fitorremediador.</p> <p>ESPECIFICOS:</p> <p>a. Determinar las propiedades físico-químicas de los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate.</p> <p>b. Determinar el contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en µg/kg MS de los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate.</p> <p>c. Determinar el contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en µg/kg MS en los tejidos aéreos y radicales de las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.</p> <p>d. Calcular el Factor de Bioconcentración (FBC) y de traslocación (FT) de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate.</p>	<p>GENERAL:</p> <p>Las especies Altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate presentan un alto potencial fitorremediador de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio.</p> <p>ESPECIFICOS:</p> <p>a. Si, los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate presentan alteraciones significativas en sus propiedades físico-químicas.</p> <p>b. Si, los suelos rizosféricos en el entorno de la Laguna de Yanamate presentan niveles elevados de contaminación por la presencia de contenidos de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio.</p> <p>c. Los tejidos de las especies altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate presentan mayores contenidos metálicos en sus tejidos radicales.</p> <p>d. Las especies Altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la Laguna de Yanamate son fitoestabilizadores de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio.</p>	<p>Variable Independiente (X)</p> <p>X = Contenido de cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio en las Especies Altoandinas <i>Calamagrostis rigida</i>, <i>Trisetum spicatum</i> y <i>Senecio rufescens</i> en el entorno de la laguna de Yanamate.</p> <p>Variable Dependiente (Y)</p> <p>Y = Potencial fitorremediador en cobre, hierro, zinc, plomo y cadmio</p> <p>Variables Intervinientes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores meteorológicos.

INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : EDITH LORENZA HUARANGA SANCHEZ

Departamento : PASCO

Distrito :

Referencia : H.R. 68266-062C-19

Bolt.: 2975

Provincia :
 Predio :
 Fecha : 22/05/19

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase	CIC	Cationes Cambiables meq/100g				Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases	
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺				Al ⁺³ + H ⁺
4162	LY-S-TS	7.17	2.10	11.00	10.75	8.8	184	57	25	18	Fr.A.	11.52	11.06	0.12	0.15	0.19	0.00	11.52	11.52	100
4163	LY-S-SR	7.59	2.09	40.10	10.43	20.8	98	69	17	14	Fr.A.	8.00	7.69	0.13	0.08	0.10	0.00	8.00	8.00	100
4164	LY-S-CR	7.50	2.25	47.70	20.50	10.1	100	67	21	12	Fr.A.	16.64	15.99	0.35	0.15	0.15	0.00	16.64	16.64	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Lab.	Número de Muestra Claves	B ppm	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	Cr ppm	Cd ppm	Pb ppm
4163	LY-S-SR	0.47	20.60	17.40	4.70	510.00	9.10	0.68	106.40
4164	LY-S-CR	0.57	29.90	30.10	15.60	680.00	10.28	0.65	65.99



Dr. Sady García Bendeuzú
Dr. Sady García Bendeuzú
 Jefe del Laboratorio

METODOS SEGUIDOS EN EL ANALISIS DE SUELOS

1. Textura de suelo: % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
2. Salinidad: medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1 o en el extracto de la pasta de saturación(es).
3. PH: medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1 ó en suspensión suelo: KCl N, relación 1:2.5.
4. Calcareo total (CaCO₃): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
5. Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio. %M.O.= %Cx1.724.
6. Nitrógeno total: método del micro-Kjeldahl.
7. Fósforo disponible: método del Olsen modificado, extracción con NaHCO₃=0.5M, pH 8.5
8. Potasio disponible: extracción con acetato de amonio (CH₃ - COONH₄)N, pH 7.0
9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio (CH₃-COOCH₃)N; pH 7.0
10. Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺ cambiabiles: reemplazamiento con acetato de amonio (CH₃-COONH₄)N; pH 7.0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.
11. Al⁺³, H⁺: método de Yuan. Extracción con KCl, N
12. Iones solubles:
 - a) Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Na⁺ solubles: fotometría de llama y/o absorción atómica.
 - b) Cl, CO₃⁼, HCO₃⁼, NO₃ solubles: volumetría y colorimetría. SO₄ turbidimetría con cloruro de Bario.
 - c) Boro soluble: extracción con agua, cuantificación con curcumina.
 - d) Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona.

Equivalencias:

- 1 ppm=1 mg/kilogramo
- 1 millimho (mmho/cm) = 1 deciSiemens/metro
- 1 miliequivalente / 100 g = 1 cmol(+)/kg
- Salas solubles totales (TDS) en ppm ó mg/kg = 640 x CEes
- CE (1 : 1) mmho/cm x 2 = CE(es) mmho/cm

TÁBLA DE INTERPRETACION

Salinidad	Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible	Relaciones Catiónicas	
Clasificación del Suelo	%	ppm P	ppm K	Clasificación	Ca/Mg
*muy ligeramente salino	<2.0	<7.0	<100	*Normal	0.2 - 0.3
*ligeramente salino	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	*defc. Mg	>0.5
*moderadamente salino	>4.0	>14.0	>240	*defc. K	>0.2
*fuertemente salino				*defc. Mg	>10

Reacción o pH

Clasificación del Suelo	pH
*fuertemente ácido	<5.5
*moderadamente ácido	5.6 - 6.0
*ligeramente ácido	6.1 - 6.5
*neutro	6.6 - 7.0
*ligeramente alcalino	7.1 - 7.8
*moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
*fuertemente alcalino	>8.5

CLASES TEXTURALES

CLASIFICACIÓN	Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible
A = arena	Fr.Ar.A = franco arcillo arenoso		
A.Fr = arena franca	Fr.Ar = franco arcilloso		
Fr.A = franco arenoso	Fr.Ar.L = franco arcilloso limoso		
Fr. = franco	Ar.A = arcilloso arenoso		
Fr.L = franco limoso	Ar.L = arcilloso limoso		
L = limoso	Ar. = arcilloso		

Distribución de Cationes %

Cationes %	Distribución de Cationes %
Ca ⁺²	=
Mg ⁺²	=
K ⁺	=
Na ⁺	=

Ca ⁺²	=	60 - 75
Mg ⁺²	=	15 - 20
K ⁺	=	3 - 7
Na ⁺	=	<15



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS

LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS FOLIAR

SOLICITANTE : EDITH LORENZA HUARANGA SANCHEZ
PROCEDENCIA : PASCO
MUESTRA DE : RAICES DE TEJIDO VEGETAL
REFERENCIA : H.R. 68267
BOLETA : 2975
FECHA : 23/05/2019

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Fe ppm	B ppm	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
2288	LY-R-SR	420	71	62	3770	24	22.60	2.78	0.45
2289	LY-R-TS	748	246	311	19088	23	255.25	11.40	4.63
2290	LY-R-CR	684	106	158	7658	16	252.75	3.33	1.53



Dr. Sady García Bendezu
Dr. Sady García Bendezu
Jefe de Laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS FOLIAR

SOLICITANTE : EDITH LORENZA HUARANGA SANCHEZ
PROCEDENCIA : PASCO
MUESTRA DE : HOJAS Y TALLOS
REFERENCIA : H.R. 68268
BOLETA : 2975
FECHA : 23/05/2019

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Fe ppm	B ppm	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
2291	LY-HT-SR	419	31	90	1248	70	15.40	2.28	0.80
2292	LY-HT-TS	565	77	108	1645	11	29.75	2.65	0.78
2293	LY-HT-CR	143	13	53	1083	7	8.48	0.65	0.30



Dr. Sady Garcia Bendezú
Dr. Sady Garcia Bendezú
Jefe de Laboratorio

PANEL FOTOGRAFICO

RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

1.1. Selección de estaciones de muestreo



1.2. Toma de coordenadas geograficas



1.3. Extracción de las Especies Altoandinas



1.4. Separación de suelos rizosféricos



1.5. Separación de la parte aérea (tallos y hojas) y raíces



1.6. Pesado de las muestras extraídas



1.7. Muestras por especie



1.8. Deposito en bolsas hermeticas

