



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS – INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**EVALUAR LA VARIEDAD DE ICHU (*Stipa ichu*) COMO BIOINDICADOR DE  
As Y Hg EN LOS RELAVES MINEROS DE LA CUENCA DEL RÍO  
LLALLIMAYO – MELGAR – PUNO**

**PRESENTADA POR:**

**OSCAR CCAHUANIHANCCO ARQUE**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**CON MENCIÓN EN: SEGURIDAD INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**

**PUNO, PERÚ**

**2023**



## OSCAR CCAHUANIHANCCO ARQUE

### EVALUAR LA VARIEDAD DE ICHU (*Stipa ichu*) COMO BIOINDICADOR DE As Y Hg EN LOS RELAVES MINEROS DE L...

15.- CIENCIAS - INGENIERÍA QUÍMICA

MAESTRIAS

Universidad Nacional del Altiplano

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:408043956

137 Páginas

Fecha de entrega

21 nov 2024, 3:56 p.m. GMT-5

23,124 Palabras

Fecha de descarga

21 nov 2024, 4:02 p.m. GMT-5

126,652 Caracteres

Nombre de archivo

EVALUAR LA VARIEDAD DE ICHU (*Stipa Ichu*) COMO BIOINDICADOR DE As Y Hg EN LOS RELAVES ....docx

Tamaño de archivo

32.1 MB



Teófilo Donalés Flores, D.Sc.  
INGENIERO QUIMICO  
C.P. 59551





## 15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

### Fuentes principales

- 15% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

- Texto oculto**  
57 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN CIENCIAS – INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

EVALUAR LA VARIEDAD DE ICHU (*Stipa ichu*) COMO BIOINDICADOR DE  
As Y Hg EN LOS RELAVES MINEROS DE LA CUENCA DEL RÍO  
LLALLIMAYO – MELGAR – PUNO



PRESENTADA POR:

OSCAR CCAHUANIHANCCO ARQUE

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

CON MENCIÓN EN: SEGURIDAD INDUSTRIAL Y AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

.....  
Dra. EDITH TELLO PALMA

PRIMER MIEMBRO

.....  
Mtro. HIGINIO ALBERTO ZUÑIGA SANCHEZ

SEGUNDO MIEMBRO

.....  
D.Sc. MARIA RODRIGUEZ MELO

ASESOR DE TESIS

.....  
D.Sc. TEOFILO DONAIRES FLORES

Puno, 15 de noviembre de 2023.

ÁREA: Investigación.

TEMA: Seguridad y Medio Ambiente.

LÍNEA: Recursos naturales y Medio ambiente.



## DEDICATORIA

*A Dios por darme salud, bienestar y guiarme en este camino de superación constante, también por encontrar personas que siempre me van dejando enseñanzas y lecciones que hacen de mí una mejor persona cada día.*

*A mis padres, quienes están conmigo en todo momento, por ser mi soporte fundamental en todo lo que emprendo, por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por apoyarme con los recursos necesarios para continuar estudiando y superándome cada día más.*

*Con amor a mis hijas Lucia y Maggilei, que son mi motivo y motor para no rendirme nunca y a mi pareja Mayhumi Leon por su apoyo constante en la ejecución del presente trabajo.*

***Oscar Ccahuanihancco Arque.***



## AGRADECIMIENTOS

*De manera general a todas aquellas personas que han contribuido de una u otra forma brindándome su apoyo oportuno y necesario en el desarrollo y culminación de la presente investigación.*

*A los docentes de la Maestría en Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano por su dedicación y esmero en impartir sus conocimientos y compartir sus experiencias.*

*A los miembros del jurado revisor. Por sus acertadas correcciones y sugerencias para la culminación de la investigación.*

*A mi director / Asesor de Tesis, Dr. Teófilo Donaires Flores, expreso mi profundo agradecimiento por su tiempo, apoyo y su orientación en el desarrollo de la presente investigación.*

***Oscar Ccahuanihancco Arque.***



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	vii
ACRÓNIMOS	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Marco teórico	5
	1.1.1 Contexto	5
	1.1.2 Metales pesados	6
	1.1.3 Arsénico	7
	1.1.4 Mercurio	10
	1.1.5 Límite máximo permisible (LMP)	13
	1.1.6 Comportamiento de los Metales Pesados en el Suelo	13
	1.1.7 Identificación de Peligros en los Metales Pesados	15
	1.1.8 Conceptos Eco toxicológicos	17
	1.1.9 Bioensayos	18
	1.1.10 Bioindicador	19
	1.1.11 Biomarcadores	19
	1.1.12 Plantas Metalofitas	21
	1.1.13 Planta Ichu	22
1.2	Antecedentes	27
	1.2.1 Internacionales	27
	1.2.2 Nacionales	33
	1.2.3 Locales	36



## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	38
2.2	Enunciados del problema	39
2.2.1	Problema general	39
2.2.2	Problemas específicos	39
2.3	Justificación	39
2.4	Objetivos	40
2.4.1	Objetivo general	40
2.4.2	Objetivos específicos	40
2.5	Hipótesis	41
2.5.1	Hipótesis general	41
2.5.2	Hipótesis específicas	41

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y METODOS

3.1	Lugar de estudio	43
3.2	Población	44
3.3	Muestra	44
3.4	Método de la Investigación	46
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	49
3.6	Aplicación de prueba estadística inferencial	50
3.6.1	Hipótesis estadística	50

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Resultados	51
4.1.1	Determinación de la concentración de As y Hg en las muestras	51
4.2.1	Identificación de peligros y análisis de riesgos por presencia de As y Hg	64
4.2	Discusión	75
	CONCLUSIONES	76
	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXOS	87



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Límites máximos permisible (LMP) de metales pesados en aguas	13
2. Efectos de los metales pesados en el ambiente y la salud	16
3. Codificación de muestras y ubicación por coordenadas	45
4. Variación de la Concentración de arsénico (ppm)	58
5. Variación de la Concentración de mercurio (ppm)	59
6. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk de As	60
7. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en As	61
8. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk del Hg	62
9. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en Hg	63
10. Probabilidad de que ocurra el(los) evento(s) asociado(s)	65
11. Criterios de severidad	65
12. Evaluación y clasificación del riesgo	66
13. Matriz de evaluación y clasificación del riesgo	73
14. Matriz de evaluación y clasificación del riesgo ambiental	74



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Pajonales de Festuca Orthopylla	23
2. Variedades de Stipa Ichu	24
3. Planta de Festuca Dolichophylla	25
4. Ubicación geográfica de la cuenca Llallimayo	43
5. Río Llallimayo donde se extrajeron las muestras de Stipa Ichu	44
6. Diagrama del desarrollo de la metodología de investigación	46
7. Concentraciones de As encontrados en la fuente	51
8. Concentración de Hg encontrados en la fuente	53
9. Concentración de As encontrados en zona de influencia	55
10. Concentración de Hg encontrados en zona de influencia	57



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Matriz de consistencia	87
2. Promedio de valores de concentración en los puntos de muestreo	89
3. Informe de ensayos	91
4. Fotografías del desarrollo de la investigación	105
5. Guía de Muestreo Geobotánico (IGAC)	110
6. Protocolo de Métodos de Análisis de la Universidad de Concepción – Chile	118
7. Coeficientes del estadístico de Shapiro-Wilk	130



## ACRÓNIMOS

AAFCO	:	Asociación de Oficiales Estadounidenses de Control de Alimentos
ADN	:	Ácido Desoxirribonucleico
ANA	:	Autoridad Nacional del Agua
As	:	Arsénico
CBCI	:	Índice de Bioconcentración Integral
CIIC	:	Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer
CT	:	Tratamientos de Control
DHHS	:	Departamento de Salud y Servicios Humanos
ECA	:	Estándar de Calidad Ambiental
FBC	:	Factores de Bioconcentración
Hg	:	Mercurio
IGAC	:	Instituto Geográfico Agustín Codazi
IPERC	:	Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles
MAI	:	Índice de Acumulación de Metales
MCN	:	Ensayo de Detención de Micronúcleos
OMS	:	Organización Mundial de la Salud
ROS	:	Especies Reactivas de Oxígeno
SPSS	:	Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales
SQE	:	Estándares de Calidad Ambiental
Tf	:	Potencial de Translocación
UNAP	:	Universidad Nacional del Altiplano Puno
UNCP	:	Universidad Nacional del Centro del Perú
USEPA	:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos



## RESUMEN

La contaminación por metales pesados, como el arsénico y el mercurio, provenientes de los relaves mineros, representa un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y terrestres. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad de la variedad de "ichu" (*Stipa ichu*) como bioindicador de la presencia de arsénico (As) y mercurio (Hg) en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo. En el aspecto metodológico, se adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo experimental, empleando un diseño no probabilístico de muestreo y análisis de correlación. La población de estudio estuvo constituida por la vegetación de *Stipa ichu* presente en la cuenca del río Llallimayo, y la muestra comprendió 10 puntos de muestreo a lo largo de la orilla del río y en una zona de influencia directa a 6 m del borde. Para el procesamiento de datos se utilizó el software SPSS para realizar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y evaluar la distribución de los datos, así como la prueba de Spearman. Los resultados indicaron que *Stipa ichu* tiene una alta capacidad de bioacumulación para ambos metales, con concentraciones que superan los límites máximos permisibles establecidos por la legislación nacional. Para arsénico, la concentración máxima registrada fue de 0,75 ppm en la fuente, mientras que para mercurio se observó una concentración de 0,021 ppm. Se concluye que *Stipa ichu* es un bioindicador efectivo para la presencia de As y Hg, lo cual puede ser utilizado para monitorear la contaminación ambiental en zonas afectadas por relaves mineros.

**Palabras clave:** Arsénico, bioindicador, mercurio, metales pesados, relave minero.

## ABSTRACT

Contamination by heavy metals, such as arsenic and mercury, from mining tailings represents a significant risk to aquatic and terrestrial ecosystems. The objective of this research was to evaluate the capacity of the “ichu” variety (*Stipa Ichu*) as a bioindicator of the presence of arsenic (As) and mercury (Hg) in the mining tailings of the Llallimayo river basin. In the methodological aspect, a quantitative, experimental approach was adopted, using a non-probabilistic sampling design and correlation analysis. The study population was constituted by the *Stipa Ichu* vegetation present in the Llallimayo river basin, and the sample included 10 sampling points along the river bank and in a direct zone of influence 6 m from the edge. For data processing, SPSS software was used to perform the Shapiro-Wilk normality test and evaluate the distribution of the data, as well as Spearman's test. The results indicated that *Stipa Ichu* has a high bioaccumulation capacity for both metals, with concentrations that exceed the maximum permissible limits established by national legislation. For arsenic, the maximum concentration recorded was 0.75 ppm at the source, while for mercury a concentration of 0.021 ppm was observed. It is concluded that *Stipa Ichu* is an effective bioindicator for the presence of As and Hg, which can be used to monitor environmental contamination in areas affected by mining tailings.

**Keywords:** Arsenic, bioindicator, heavy metals, mercury, mining tailings.



Dr. [Signature] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Q.F. 01272

## INTRODUCCIÓN

El Perú es considerado entre los primeros puestos en toda Latinoamérica y el mundo en la producción y explotación minera, sin embargo, esta actividad de manera no sostenible ha generado contaminación debido a los inadecuados manejos de sus residuos y efluentes que han provocado el deterioro de las principales fuentes hídricas y de suelos (Arce, 2017).

Las investigaciones referidas a considerar bioindicadores a la flora nativa presente en los relaves mineros que son empleados en las últimas décadas como herramienta rutinaria de diagnóstico, monitoreo y gestión en los sistemas ambientales son escasas y no muy convencionales (Anze et al., 2007).

Se puede sostener que este proyecto de investigación a ejecutar es un alcance desde una nueva perspectiva para considerar al ichu (*Stipa Ichu*) como un bioindicador de la presencia de metales pesados (As y Hg), además de resaltar la posibilidad de fitorremediación como una alternativa de remediación ambientalmente amigable, visualmente atractiva, y que no modifica sustancialmente la estructura del suelo (Becerril et al., 2007). Y así dar una nueva herramienta de medición correspondiente a un monitoreo geobotánico que se debería considerar con respecto al desempeño ambiental de la industria minera puesto que muchas veces solo se toma en referencia al monitoreo de aguas y suelos de manera independiente, mas no viendo la relación de ellos frente al desarrollo de la flora en las zonas circundantes que básicamente son un resultado de la interacción entre los factores bióticos y abióticos.

La investigación se focaliza en la especie vegetal ichu (*Stipa Ichu*) presente en los efluentes de la actividad minera en la cabecera de la cuenca del río Llallimayo puesto que es actualmente una zona que viene siendo fuente de bastantes conflictos sociales por parte de la población que viene sufriendo grandes impactos en sus actividades por la presencia de efluentes mineros que van uniéndose a otras fuentes de agua que usan los pobladores para su actividad agrícola y ganadera, los cuales han ido disminuyendo cada vez observándose pérdidas de terreno agrícola, muerte de especies nativas y enfermedades que afectan a los animales domésticos base de la economía de la zona.



Los resultados de la investigación ayudarán a cuantificar mejor la contaminación actual de la zona y proporcionarán una variable adicional para las cuestiones de evaluación ambiental, concienciando a los implicados en la actividad minera y ofreciendo a los organismos de supervisión ambiental algo más en lo que pensar a la hora de evaluar los impactos ambientales. El trabajo también tiene valor metodológico, ya que podría servir de modelo para futuras investigaciones que empleen enfoques compatibles, lo que permitiría realizar estudios colaborativos en apoyo de estos retos medioambientales.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco teórico

##### 1.1.1 Contexto

Podemos determinar el potencial bioindicativo de metales pesados, a las especies vegetales, que tienen una función reguladora de los contaminantes, evaluando la cantidad de metales pesados en el medio ambiente. Los múltiples métodos de bioindicación en los que se utilizan líquenes, hongos, cortezas de árboles y hojas de las plantas superiores como biomarcadores, biosensores o en biopruebas, son empleados en las últimas décadas como herramienta rutinaria de diagnóstico, monitoreo y gestión en los sistemas ambientales (Anze et al., 2007).

El estudio de metales pesados toma interés debido al impacto ambiental por su grado de contaminación, potencial tóxico y de ecotoxicidad (Duffus, 2003).

El concepto "metal pesado" suele ser aplicado a elementos metálicos con masas atómicas elevadas. Metales pesados como el Cd, Cu, Pb y Cr son importantes contaminantes ambientales particularmente en áreas con alta concentración urbana (Johnston, 2005).

La presencia de metales pesados en la atmósfera, suelo y agua puede causar serios problemas en todos los organismos y efectos bioacumulativos en especies, como es el caso de la vegetación (Khanna, 2011).

Las especies vegetativas ubicadas en sitios contaminados por metales pesados se enfrentan a mantener una respuesta de crecimiento que puede ser afectada desde la parte aérea y del suelo (Gremion et al., 2007).

La vegetación puede llegar a ser tolerante al acumular metales en sus tejidos aéreos, incluso cuando las concentraciones en suelo son muy bajas, evidenciando su utilidad para el diseño de tecnologías innovadoras y ecológicas en la restauración de suelos con metales pesados, como el caso de la fitorremediación (Becerril et al., 2007).

### 1.1.2 Metales pesados

El término “metal pesado” suele referirse a metales cuyo peso específico es superior a 5 g/cm<sup>3</sup> y que tiene un número atómico superior de 20; no obstante, no todos los elementos que tienen estas características presentan otras propiedades análogas, por ejemplo, ser esenciales o no para funciones biológicas (Brady y Weil, 2008).

Para aquellos metales que son esenciales para los seres vivos (Cu, Zn, Fe, entre otros), generalmente existe un equilibrio entre sus fracciones disponible y no disponible en el suelo, pero con frecuencia se producen alteraciones en los aportes o pérdidas de dichos elementos que modifican su ciclo y dan lugar a que se encuentren en proporciones tóxicas o deficientes (Ferré et al., 2007).

Otro grupo de metales no tienen funciones biológicas identificadas (As, Cd, Hg, Pb, entre otros), por lo que éstos se consideran tóxicos por las pequeñas dosis que causan efectos (Labys et al., 1998).

Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre y suelen estar presentes en todas las matrices ambientales. Sin embargo, la concentración de varios metales pesados se ha incrementado en algunos ecosistemas como resultado de actividades antropogénicas. La fuerte contaminación ambiental por metales ha seguido ganando atención mundial, principalmente debido a los riesgos toxicológicos que estos metales representan para la salud humana (Ayodeji y Olorunsola, 2011).

Aunque los elementos metálicos son a menudo esenciales para los organismos vivos, se vuelven tóxicos cuando están presentes en altas concentraciones. El rápido aumento de la población humana, junto con la industrialización fortuita y el avance tecnológico, ha causado muchos problemas ambientales graves en todo el mundo; entre las causas de tales problemas está la producción y liberación de metales tóxicos. En las últimas décadas, la concentración de metales pesados en el suelo y en las aguas superficiales ha aumentado considerablemente y para los humanos al ingresar a la cadena alimentaria. Debido a la presencia generalizada de metales pesados en el medio

ambiente, sus residuos también alcanzan y se asimilan en plantas medicinales (Sarma et al., 2012).

La contaminación por metales pesados es un problema que ha ido en aumento debido principalmente a actividades antrópicas. Entre las principales fuentes de contaminación se encuentran la minería, la metalúrgica, la agricultura, los vehículos automotores y el aporte natural en ciertos acuíferos (Covarrubias y Peña, 2017).

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental el arsénico, cadmio, cromo, plomo y mercurio no son biodegradables y poseen un alto grado de toxicidad pues incluso en niveles bajos de exposición inducen a múltiples daños en órganos vitales del cuerpo humano, además de estar clasificados como carcinógenos humanos (Quispe, 2019).

Las propiedades del suelo influyen considerablemente en el grado de toxicidad y concentración de los metales en él. Así, la distribución de los metales pesados en los perfiles del suelo, así como su biodisponibilidad, está controlada por las propiedades intrínsecas del metal (Suaña, 2017).

### 1.1.3 Arsénico

Las propiedades del suelo influyen considerablemente en el grado de toxicidad y concentración de los metales como el arsénico. Aunque suele encontrarse en la superficie de las rocas en combinación con azufre o metales como Mn, Fe, Co, Ni, Ag o Sn, el arsénico se encuentra de forma natural como mineral de cobalto. La arsenopirita, o pilo, es el principal mineral de arsénico; otros arseniuros metálicos son la löllingita ( $\text{FeAsS}$ ), la nicolita ( $\text{NiAs}$ ), el cobalto brillante ( $\text{CoAsS}$ ), la gersdorffita ( $\text{NiAsS}$ ) y la enameltita ( $\text{CoAs}_2$ ).

El arsénico puede encontrarse en la mayoría de los minerales sulfurosos y es frecuente encontrarlo en tioarsenatos y arseniatos naturales. La realgarita ( $\text{As}_4\text{S}_4$ ) y el oropimente ( $\text{As}_4\text{S}_6$ ) son los dos minerales más significativos que contienen azufre. El óxido, arsenolita,  $\text{As}_4\text{O}_6$ , se recupera de los polvos recogidos de las tuberías durante la extracción de Ni, Cu y Sn; también puede fabricarse calcinando arseniuros de Fe, Co o Ni con aire u oxígeno. Se descubre como resultado de la alteración debida a los agentes atmosféricos de diversos minerales

arsenicales. El elemento puede obtenerse por calcinación de  $\text{FeAsS}$  o  $\text{FeAs}_2$  en ausencia de aire o por reducción de  $\text{As}_4\text{O}_6$  con carbonato, cuando se sublima  $\text{As}_4$  (O'Neill, 2017).

Se clasifica como metaloide, o elemento a medio camino entre los metales y los no metales, y se encuentra en la corteza terrestre con una concentración media de 2 ppm. Pertenecce al grupo V de la Tabla Periódica. El arsénico se encuentra principalmente en formas inorgánicas en la naturaleza, como el arseniato y el arsenito. El arseniato es generalmente estacionario en los suelos en circunstancias aeróbicas debido a su fuerte afinidad por los oxihidróxidos de hierro ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) y los óxidos de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ). El arsenito, en cambio, tiene una baja atracción por ambas formas y es más móvil (Meharg y Zhao, 2012).

Pueden encontrarse formas orgánicas de arsénico, ya que son creadas por el metabolismo de plantas, animales y microbios. En comparación con las formas inorgánicas, compuestos como el ácido monometilarsénico, el ácido dimetilarsénico, la arsenobetaina y los arsenozúcares son menos peligrosos (Singh y Ma, 2006).

El arsénico en animales y en plantas se combina con carbono e hidrógeno para formar compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos de arsénico se usan como plaguicidas, principalmente en cosechas de algodón y huertos frutales (Quispe, 2019).

Algunos de los síntomas que se manifiestan debido a la ingestión crónica de arsénico son: cambios en la coloración de la piel, arterosclerosis, fallas renales, efectos neurológicos, enfermedades cardiovasculares, esterilidad y cáncer en piel, pulmones, hígado y riñones (Singh y Ma, 2006).

Otras fuentes de emisiones de arsénico de origen humano son las explotaciones mineras y la fundición y refinado de metales no féreos (Pb, Zn y Cu). Además, existe la posibilidad de que la continua actividad volcánica de la cordillera de los Andes o la erosión de las reservas minerales liberen arsénico al medio ambiente (Castro, 2006).

La absorción de niveles elevados de arsénico puede ser letal. Los problemas digestivos, la disminución del recuento de glóbulos rojos y blancos, los ritmos cardíacos irregulares, la fragilidad capilar y el hormigueo en manos y pies pueden deberse a niveles bajos de concentración. La ingesta o inhalación prolongada de arsénico inorgánico puede provocar una decoloración aberrante de la piel y la aparición de callosidades o verrugas en las manos, los pies y el pecho. El contacto de la piel con arsénico inorgánico puede provocar queratosis, que es un crecimiento excesivo y engrosamiento del epitelio, así como hinchazón y enrojecimiento. Poca información existe sobre los efectos de los compuestos orgánicos de arsénico en seres humanos (Hall, 2002).

El consumo de arsénico inorgánico se ha relacionado con un mayor riesgo de cáncer de piel, hígado, vejiga y pulmón, según varios estudios. Según la USEPA y el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS), se sabe que el arsénico inorgánico provoca cáncer en los seres humanos. Según el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC), el arsénico inorgánico puede provocar cáncer en los seres humanos (Matta y Gjyli, 2016).

#### **A. Efectos ambientales y riesgos del Arsénico**

Pequeñas cantidades de arsénico están presentes de forma natural en el suelo. Esto ocurre en los minerales y el suelo, y las tormentas de polvo y el agua de escorrentía pueden transferirlo al aire, el agua y el suelo (O'Neill, 2017).

Es muy difícil descomponer el arsénico en compuestos volátiles o solubles en agua. De hecho, el arsénico es una sustancia química naturalmente móvil, lo que significa que es poco probable que se produzcan cantidades significativas en un lugar concreto. Esto es positivo, pero como el arsénico se propaga con facilidad, existe el riesgo de que la contaminación por arsénico se convierta en un problema grave. Cuando el arsénico es inmóvil, resulta difícil movilizarlo. Debido a las actividades humanas, mayormente a través de la minería y la fundición, naturalmente el Arsénico inmóvil se ha movilizó también y puede ahora ser encontrado en muchos lugares donde ellos no existían de forma natural (O'Neill, 2017).

Los alimentos pueden contener cantidades elevadas de arsénico, ya que las plantas lo absorben con facilidad. El material genético de los peces puede alterarse debido a los peligrosos niveles de arsénico inorgánico que se encuentran actualmente en las aguas superficiales. La acumulación de arsénico en las especies que consumen plantas de agua dulce es la principal causa de ello. Las aves comen peces que contienen eminentes cantidades de Arsénico y morirán como resultado del envenenamiento por Arsénico como consecuencia de la descomposición de los peces en sus cuerpos (O'Neill, 2017).

#### 1.1.4 Mercurio

Entre las formas comunes del mercurio se encuentra su sulfuro HgS, que se ve con frecuencia como cinabrio rojo. El cinabrio metálico negro es menos frecuente. El mineral cloruro de mercurio (I) es menos frecuente. En los minerales de mercurio pueden encontrarse ocasionalmente pequeñas gotas de mercurio metálico (Greenwood y Earnshaw, 2012).

En el agua, suelo, plantas y animales se encuentra formando sales inorgánicas o como mercurio orgánico (metilmercurio). El mercurio atmosférico precipita por sedimentación o por la lluvia y puede volver a re-emitirse formando un ciclo aire-tierra-agua con una compleja serie de transformaciones fisicoquímicas (Greenwood y Earnshaw, 2012).

El mercurio es un metal natural muy presente en el medio ambiente. Se libera a la atmósfera por la actividad volcánica, el viento y la descomposición mineral inducida por el agua en las rocas y el suelo. La cantidad de mercurio en el medio ambiente no ha dejado de aumentar como consecuencia de los recientes vertidos, en gran medida continuos, de mercurio procedente de fuentes naturales. El uso de combustibles fósiles, la minería, la fundición y la incineración de residuos sólidos son las principales causas del 80 % de mercurio elemental emitido al aire como resultado de la actividad humana. Los fungicidas y fertilizantes representan alrededor del 15 % del total que se libera al suelo (Matta y Gjyli, 2016).

El mercurio puede encontrarse en el medio ambiente de forma natural y en diversas formas. Las tres categorías a las que pertenecen estas formas son el mercurio metálico (también denominado mercurio elemental), el mercurio inorgánico y el mercurio orgánico.

El mercurio metálico es el metal líquido común que se encuentra en varios interruptores eléctricos y termómetros. Parte del mercurio metálico se evapora y se convierte en vapor de mercurio a temperatura ambiente. Los vapores de mercurio no tienen color ni olor. El mercurio metálico líquido producirá más vapores a mayor temperatura. Algunas personas que han inhalado vapores de mercurio han notado un sabor metálico en la lengua (Matta y Gjyli, 2016).

Los compuestos orgánicos de mercurio son los que se crean cuando el mercurio y el carbono se mezclan. El metilmercurio, también denominado monometilmercurio, es el componente orgánico de mercurio más frecuente en el medio ambiente (Matta y Gjyli, 2016).

La toxicidad resultante de la exposición subcrónica y crónica al mercurio y sus compuestos generalmente involucra a los riñones y/o a los componentes del sistema nervioso, los órganos blancos y el efecto depende de la forma de mercurio (Quispe, 2019).

El sistema nervioso humano es muy sensible a todas formas de mercurio. Como entra menos mercurio en el cerebro, el metilmercurio y los vapores de mercurio metálico son menos nocivos. Los sistemas neurológico y renal pueden sufrir daños importantes por la exposición prolongada a concentraciones elevadas de mercurio en sus formas metálica, inorgánica u orgánica. Las reacciones de la función cerebral pueden manifestarse como problemas de memoria, timidez, convulsiones, dificultades de irritabilidad y deficiencias visuales o auditivas. La exposición por corto tiempo a altos niveles de vapores de mercurio metálico puede causar lesiones al pulmón, náusea, vómitos, diarrea, aumento de la presión sanguínea o del pulso, salpullidos e irritación a los ojos (Quispe, 2019).

No parece haber mucha información sobre las consecuencias teratogénicas de la exposición al mercurio orgánico o inorgánico ni en humanos ni en animales. No obstante, hay pruebas de abortos espontáneos y alteraciones del ciclo menstrual provocados por el mercurio (Matta y Gjyli, 2016).

El tipo, la concentración y la duración de la exposición al mercurio influyen en lo perjudicial que resulta para la salud humana. El metilmercurio [CH<sub>3</sub>Hg]<sup>+</sup> es la forma más letal de mercurio, ya que se absorbe en el 90 % de los casos, mientras que el cloruro de mercurio (HgCl<sub>2</sub>) sólo se absorbe en el 2 % de los casos. Las consecuencias para la salud abarcan daños en varios órganos, incluidos el cerebro y los riñones, además de problemas en el sistema nervioso (Quispe, 2019).

#### **A. Efectos ambientales y riesgos del Mercurio**

Cuando las rocas y los suelos están expuestos al viento y al agua, los minerales que contienen se descomponen, liberando mercurio a la atmósfera. A lo largo del tiempo, la cantidad de mercurio liberado por fuentes naturales no ha cambiado. Todavía las concentraciones de Mercurio en el medioambiente están creciendo; esto es debido a la actividad humana (O'Neill, 2017).

Ciertas acciones humanas, como el uso de fertilizantes en la agricultura y el vertido de residuos industriales, liberan directamente mercurio en el suelo o el agua. Las aguas superficiales o los suelos acabarán conteniendo todo el mercurio vertido en el ecosistema (O'Neill, 2017).

Se pueden encontrar concentraciones significativas de mercurio en aguas superficiales ácidas. Las concentraciones de mercurio en el agua aumentarán cuando los niveles de pH se sitúen entre cinco y siete debido a la movilización del mercurio por el suelo. Los microorganismos tienen la capacidad de transformar el mercurio que ha llegado a las aguas superficiales o a los suelos en metilmercurio, que la mayoría de los organismos pueden absorber rápidamente y que se sabe que daña el sistema neurológico. Los peces se encuentran entre las criaturas que

absorben regularmente niveles significativos de metilmercurio de las aguas superficiales. Por consiguiente, los peces y las cadenas alimentarias de las que forman parte pueden recoger metilmercurio. Los efectos del Mercurio en los animales son daño en los riñones, trastornos en el estómago, daño en los intestinos, fallos en la reproducción y alteración del ADN (O'Neill, 2017).

### 1.1.5 Límite máximo permisible (LMP)

Para los metales objeto de investigación, los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos provenientes de operaciones minero metalúrgicas, establecidos por el Decreto Supremo N° 010 - 2010 - MINAM, son los siguientes:

**Tabla 1**

*Límites máximos permisible (LMP) de metales pesados en aguas*

Elemento	Símbolo	LMP (mg/L)
Arsénico	As	0,100
Mercurio	Hg	0,002

*Nota.* D.S. 010-2010-MINAM (2010).

### 1.1.6 Comportamiento de los Metales Pesados en el Suelo

Tras su incorporación al suelo, los metales y metaloides pueden pasar por muchos procesos que aceleran o ralentizan su difusión en el suelo u otros medios. El más preocupante es la entrada del metal en las cadenas tróficas, que puede producirse mediante procesos de absorción por las plantas o por lixiviación a las aguas subterráneas, dependiendo de lo soluble que sea el metal. La volatilización es otro método por el que los materiales pasan del suelo a las cadenas tróficas. Inicialmente, estos materiales son transportados a la atmósfera, donde pueden ser respirados y entrar después en el metabolismo de un animal (Ginocchio y Baker, 2004).

El suelo y la planta son los dos componentes principales de un ciclo biogeoquímico que incluye un mayor porcentaje de metales pesados en las tierras agrícolas. Estas sustancias entran primero en el suelo a través del aire (partículas

minerales, aerosoles, polvo en suspensión, etc.) y de la tierra (pesticidas, residuos sólidos, etc.). Después, se eliminan por absorción de las plantas, lixiviación y erosión. La participación de las distintas vías de transferencia de estos elementos varía considerablemente; depende del tipo de elemento, especie vegetal, tipo de suelo, prácticas agrícolas, etc. (Ferré et al., 2007).

El principal método por el que se transmiten a los humanos es a través del consumo de alimentos (plantas y animales). La insolubilización de estos metales se atribuye a reacciones de oxidación (el compostaje es un proceso bio oxidativo) que, juntamente con el pH del medio (más alcalino que el inicial) hace que se formen óxidos, hidróxidos y carbonatos poco solubles y a que, es posible, que una pequeña fracción forma complejos o quelatos con la fracción orgánica, más polimerizada al final del proceso (Ferré et al., 2007).

Cabe mencionar que las propiedades químicas únicas de cada elemento tienen un impacto significativo en esto. El tipo y composición del suelo, las características de las especies orgánicas e inorgánicas y su poder quelante, el valor y márgenes del pH, el estado redox y la especiación química, así como las interacciones suelo/planta de la rizósfera y la naturaleza, sensibilidad y edad del vegetal, ocupan también un lugar central en las relaciones de disponibilidad, toxicidad y respuesta de las plantas al estrés por metales (Baker, 1981).

Por ejemplo, el mercurio existe de forma natural en el suelo como  $Hg^{2+}$  y también se libera a la atmósfera, a la intemperie y en la materia vegetal descompuesta. En los suelos, la solubilidad de las especies químicas  $Hg(OH)_2$ ,  $HgS$  y  $HgO$  controla la transferencia de mercurio. El  $HgO$  es la especie más común de mercurio en solución cuando el pH es superior a 5 y se dan las condiciones oxidantes. Como sulfuro, el  $HgO$  precipita como  $HgS$  en circunstancias reductoras. Los valores máximos de solubilidad del mercurio se observan en condiciones con alto contenido de oxígeno. El mercurio es absorbido por materiales orgánicos, hierro y óxidos de manganeso, principalmente arcillas, una vez depositado en el suelo. Los minerales arcillosos son muy importantes en la inmovilización del mercurio debido a su superficie específica y a su reactividad, especialmente en suelos neutros o con poca materia orgánica. Dado que el mercurio tiene una gran afinidad por los grupos funcionales de las moléculas

orgánicas que contienen azufre, se encuentra mayoritariamente ligado a los componentes del suelo. Los enlaces fuertes hacen que el mercurio sea menos móvil y biodisponible en el suelo, lo que da lugar a cantidades traza del metal soluble típicamente presentes en la solución del suelo, predominando el  $Hg^{2+}$  y las formas complejas no cargadas. La solubilidad del mercurio está más concentrada en complejos que contienen materia orgánica soluble en suelos ácidos (pH 3 a 5). En suelos neutros o que contienen poca materia orgánica, los óxidos de hierro y las arcillas predominarían en la solubilidad, y la movilidad del mercurio aumentaría al disminuir el pH. Sólo la fracción soluble de mercurio, que está en equilibrio con la fracción de mercurio retenida en los componentes más débiles del suelo, es absorbida por las plantas (Yarto et al., 2004).

### **1.1.7 Identificación de Peligros en los Metales Pesados**

Los metales pesados pueden ocasionar diversos efectos tóxicos que dependen de: (1) la concentración biodisponible del metal; (2) forma química del metal; (3) de las condiciones fisicoquímicas del medio (pH, potencial redox, agentes complejantes disponibles, grado de saturación del medio, etc.); y (4) del tipo de organismo y su estado de desarrollo (Kabata y Szteke, 2015).

Cuando se evalúan efectos tóxicos en organismos vegetales, se debe tener en cuenta la tolerancia y adaptación que algunas plantas pueden desarrollar para resistir altas concentraciones de metales pesados y que son llamadas metalofita (Bothe, 2011).

Con excepción del Hierro (Fe), que puede estar presente en el suelo en concentraciones hasta de 10 %, todos los metales pesados con una concentración de 0,1 % o más en el suelo, pueden llegar a ser tóxicos para algunas especies y para otras no, y así generar un cambio en la estructura de la comunidad vegetal del sitio contaminado (Kabata y Szteke, 2015).

El caso del arsénico (As) es especialmente intrigante, ya que multitud de investigaciones han demostrado una correlación entre la concentración de As en el suelo y la de las plantas, sobre todo en sus raíces y hojas. Existe el problema de fitotoxicidad cuando el As se encuentra en concentraciones elevadas tanto en su forma arseniatos y arsenitos, ya que reaccionan con muchas enzimas y generan un

desbalance del fósforo necesario para las plantas; estudios recientes describen al menos dos especies tolerantes a altas concentraciones de As, mezquites (*Prosopis laevigata*), y huizaches (*Acacia farnesiana*) (Kabata y Szteke, 2015).

Los metales pesados pueden sufrir múltiples mecanismos de tolerancia en el citoplasma de las células vegetales, pueden unirse a grupos funcionales esenciales, como el grupo SH presente en enzimas, provocando la inactivación de las mismas; sustituir elementos funcionales en grupos prostéticos de las enzimas, resultando una inactivación catalítica, por ejemplo el Cd sustituyendo al Zn en proteínas; o motivar la generación de ROS (en español, especies reactivas de oxígeno), a su vez, los ROS generan en la célula reacciones tipo Fenton, la cual genera la bivalencia en metales o que el catión del metal pesado cambie su estado de oxidación (Bothe, 2011).

**Tabla 2**

*Efectos de los metales pesados en el ambiente y la salud*

Elemento	Impactos sobre el medio ambiente	Impactos sobre la salud
Arsénico	Uno de los metaloides más peligrosos que se encuentran en el medio ambiente es el arsénico (As), y diversas variables químicas, físicas y biológicas influyen en su especiación. elementos fisiológicos. Dado que el arsénico se moviliza fácilmente en el medio ambiente, su dispersión y contaminación se deben tanto a actividades naturales como humanas.	El arsénico inorgánico es la contaminación química más importante del agua potable en todo el mundo y se ha demostrado que provoca cáncer. También existen formas orgánicas de arsénico. Mientras que los compuestos orgánicos de arsénico, como los del pescado y el marisco, son menos peligrosos para la salud, los compuestos inorgánicos de arsénico, como los del agua, son increíblemente venenosos. Los humanos pueden ser expuestos al arsénico a través de la comida, agua y aire pudiendo desarrollar: Irritación del estómago e intestinos. Disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos. Cambios en la piel. Irritación de los pulmones; Cáncer de piel, pulmón, hígado.

Elemento	Impactos sobre el medio ambiente	Impactos sobre la salud
Mercurio	<p>La capacidad del mercurio para acumularse en los organismos y ascender por la cadena alimentaria es un elemento que contribuye significativamente a sus efectos sobre el medio ambiente. Todas las formas de mercurio pueden acumularse hasta cierto punto, aunque el metilmercurio se absorbe y puede acumularse más que otras formas. Aunque normalmente ocurre en menor cantidad y con menos eficacia que el metilmercurio, el mercurio inorgánico también puede absorberse. Los efectos del mercurio en las personas y los animales vienen determinados sobre todo por la biomagnificación.</p>	<p>Infertilidad y abortos. Daña el ADN. Existen tres tipos de mercurio: elemental (o metálico), inorgánico (al que pueden estar expuestos los trabajadores de determinadas profesiones) y orgánico (como el metilmercurio, que entra en el organismo a través de los alimentos). El grado de toxicidad y los efectos que estos tipos de mercurio tienen sobre el aparato digestivo, la piel, los pulmones, los riñones, los ojos y los sistemas neurológico e inmunológico varían.</p>

*Nota.* Asociación civil centro de cultura popular Labor. Estudios en poblaciones afectadas por metales pesados en (Pacco, 2018).

### 1.1.8 Conceptos Eco toxicológicos

La ecotoxicología estudia el impacto de las sustancias tóxicas en los procesos normales de los ecosistemas naturales, como son el intercambio de materia y energía, la estructura de las redes tróficas, la composición de las poblaciones y de las comunidades (Pérez et al., 2002).

En los últimos diez años se han producido muchos avances significativos en el campo de la investigación toxicológica gracias a las mejoras en bioinformática, un enfoque tecnológico que ayuda esencialmente a comprender los niveles moleculares de toxicidad y aumenta la información como medida de riesgo. Las pruebas de toxicidad in vivo siguen proporcionando los datos fundamentales necesarios para los procesos de toma de decisiones, pero muchas normas reguladoras del medio ambiente no se han actualizado para reflejar estos avances significativos (Aksoy y Demirezen, 2006).

En función de lo anterior, en cualquier estudio orientado a determinar los riesgos ecológicos asociados a la exposición de la biota a agentes tóxicos se debe procurar disminuir al máximo la incertidumbre que se genera en la mayor parte de trabajos de investigación ecotoxicológica, y por ello se considera prioritario la ejecución de estudios complementarios que generen información adecuada para la toma de decisiones en la intervención de las áreas afectadas (Ginocchio y Baker, 2004).

### **1.1.9 Bioensayos**

Los estudios conocidos como "bioensayos" evalúan la capacidad de un material para generar un impacto analizando las reacciones provocadas en organismos vivos e intentando desarrollar una conexión funcional dosis-respuesta. Existe la posibilidad de que la cantidad de material suministrado se mida en varias unidades. Las respuestas pueden ser ordinales (clasificadas como infección), cuantitativas discretas (número de mutaciones), dicotómicas (muerte o no muerte, contracción muscular o no contracción muscular) o cuantitativas continuas (peso, tiempo de coagulación). Las respuestas son una medida del resultado de la aplicación de la sustancia a una dosis determinada. En este sentido, tenemos un problema de regresión con una clara interpretación causa/efecto (Iannacone y Dale, 1999).

Las plantas se consideran materiales vivos que nos ayudan a comprender las interacciones cruciales entre xenobióticos, como los metales pesados, que se cree que pueden crecer o concentrarse más y provocar procesos conocidos como bioacumulación o biomagnificación. Existe diferentes maneras de realizar un estudio de monitoreo de la contaminación, de la cual existe una amplia gama de bioensayos en plantas y animales, tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos (Ankley et al., 2010).

Los estudios de exposición in situ han empleado con éxito bioensayos en plantas, que son más económicos y eficaces en el tiempo. Además, a menudo no requieren equipos especializados, pueden manipularse muestras y pueden aplicar técnicas de concentración de tóxicos. El bioensayo de *Tradescantia*, que consiste en inducir micronúcleos en tétradas, es realmente un bioensayo estandarizado (Meravi y Prajapati, 2013).

### 1.1.10 Bioindicador

Los bioindicadores son especies, o comunidades de organismos, cuyas respuestas representativas se monitorizan para evaluar una situación y proporcionar información sobre los parámetros ambientales de un ecosistema. Según González et al. (2008) se consideran bioindicadores los organismos que responden a la actividad humana en el medio ambiente.

Desde hace algunas décadas, diversas especies de plantas superiores, musgos y líquenes se emplean como bioindicadores de contaminación ambiental, dado que estos organismos brindan información acerca de la respuesta de un individuo no sólo frente a un contaminante en particular durante un cierto periodo de tiempo, sino también frente a otras variables climáticas, meteorológicas y otros contaminantes que pueden presentar interacción entre sí (Canales, 2021).

El clon 4430 de *Tradescantia* es uno de los bioindicadores que se utilizan con frecuencia para evaluar los efectos genotóxicos debido a su bajo número cromosómico ( $2n=12$ ), que la convierte en una planta susceptible a las toxinas ambientales y que puede ser tratada de diversas maneras. Esta planta es eficaz a la hora de retener mutágenos, y puede utilizarse tanto para la vigilancia medioambiental *in situ* como para la investigación en laboratorio (Padmavathiamma y Li, 2007).

Además, se evalúa el grado de estrés experimentado por la planta para proporcionar una ilustración detallada de las consecuencias tangibles de la exposición. Es aceptable deducir que si un contaminante no causa daños apreciables al bioindicador, no influirá negativamente en otras especies cuando se utilicen especies sensibles como bioindicadores (Poschenrieder y Barceló, 2003).

### 1.1.11 Biomarcadores

Los factores biológicos conocidos como biomarcadores pueden utilizarse para cuantificar o describir cualitativamente la reacción de un individuo a la exposición a una sustancia química nociva. Depende de una serie de variables, como la composición genética del organismo, la nutrición, el comportamiento y

las características fisicoquímicas de la sustancia, así como la cantidad, el momento y la vía de exposición (Padmavathiamma y Li, 2007).

Los biomarcadores pueden clasificarse como:

Los biomarcadores de exposición son indicadores que muestran que un organismo o comunidad ha estado expuesto a una sustancia nociva. Biomarcadores de efecto: los que tienen una relación directa con la forma en que una sustancia nociva actúa en un organismo. Biomarcadores de susceptibilidad, que muestran si un organismo tiene una capacidad intrínseca o aprendida para reaccionar correctamente ante una sustancia extraña.

En este caso concreto, la investigación se centró en los biomarcadores de impacto, que son características biológicas que cambian en respuesta a la exposición a determinadas condiciones ambientales, como las sustancias peligrosas. Los biomarcadores de impacto tóxico más eficaces son los que muestran cómo un agente tóxico o una combinación de ellos provoca una modificación particular y sensible en el funcionamiento normal de una célula, tejido u organismo (Gaur et al., 2014).

El ensayo de detención de micronúcleos (MCN), apropiado para muchos bioensayos a corto plazo para detener la toxicidad genética, es uno de los indicadores más utilizados para identificar los efectos genotóxicos. Estos ensayos pueden evaluar un amplio espectro de alteraciones genéticas en diversas especies y tipos celulares. El daño genético encontrado refleja todos los tipos de daño en el ADN, incluidas las mutaciones cromosómicas y puntuales (Dixit et al., 2015).

Las localizaciones de loci en el ADN que están más cerca de los centrómeros tienen más probabilidades de experimentar efectos de escisión que se producen fuera de la estructura de la tétrada. Estos hallazgos apoyan la teoría de que la exposición a EPT provoca que el material genético cromosómico se desprenda al replicarse, lo que afecta significativamente a la vulnerabilidad de una célula a los eventos mutacionales (Poschenrieder y Barceló, 2003).

### 1.1.12 Plantas Metalofitas

Las formas de contaminación son numerosas. Una de las formas más comunes de contaminación es la alta presencia de metales pesados en el suelo, producido principalmente, por actividades industriales, las consecuencias causadas por este tipo de contaminación son el deterioro de los minerales del suelo, el endurecimiento de éste y la infertilidad e imposibilidad de ser utilizado como bien de consumo, producto de los desechos de metales pesados de las empresas, el mal manejo de las aguas residuales, la sobre explotación del suelo con fertilizantes, la lluvia acida producto de las emanaciones de gases ácidos, entre otros (Ortiz y Aranibar, 2016).

Se han investigado y desarrollado muchos enfoques para abordar este problema; uno de los más intrigantes y ventajosos es la fitorremediación, que consiste en utilizar plantas con gran capacidad para extraer metales pesados y otros contaminantes del suelo y convertirlos en sustancias inocuas. Estas plantas pueden soportar altos niveles de toxicidad del suelo, atravesar suelos endurecidos y prosperar en condiciones de suelo pobres gracias a sus características fisiológicas. Las plantas hiperacumuladoras son aquellas que presentan estas características (Lara, 2018).

Debido a que limitan la absorción o translocación de los metales a las hojas, muchas especies son capaces de soportar grandes concentraciones de metales en el suelo. Esto permite a las especies retener concentraciones consistentes y relativamente bajas en la biomasa aérea a lo largo de un amplio rango de concentraciones de metales en el suelo. Nos referimos a este proceso como exclusión (Baker, 1981). Otras, denominadas acumuladoras, eliminan activamente los metales del suelo y los almacenan en formas no tóxicas en su biomasa aérea (Meagher, 2000).

Las plantas indicadoras, cuyo contenido en metales refleja el del suelo, ofrecen una reacción intermedia. Se han identificado diversos niveles de acumulación de metales en las plantas acumuladoras, que van desde niveles insignificantes hasta concentraciones notablemente elevadas de metales de clase B e intermedia, incluidos Ni, Zn, Pb y Co, en su biomasa aérea, sin mostrar signos manifiestos de toxicidad. Algunas de estas plantas -conocidas como plantas

hiperacumuladoras- ni siquiera pueden terminar su ciclo vital cuando se cultivan en suelos "normales" (Brooks et al., 1977).

Las concentraciones de metales en las hojas de las plantas hiperacumuladoras pueden ser de 10 a 100 veces superiores a las cantidades típicas (Chaney et al., 2020).

Kidd et al. (2007) las plantas que recogen más de 10.000 mg/kg de Mn y Zn, más de 1.000 mg/kg de Co, Cu, Pb, Ni, As y Se, y más de 100 mg/kg de Cd se denominan hiperacumuladoras de metales.

Las reacciones fisiológicas de las plantas a la exposición a metales pesados pueden variar en función del tipo de planta, del metal concreto al que esté expuesta y de la cantidad de metal pesado presente en el suelo. Con base en dichas respuestas las plantas pueden clasificarse en tres tipos: excluyentes, indicadoras y acumuladoras de metales pesados (Covarrubias y Peña, 2017).

### **1.1.13 Planta Ichu**

Tras analizar las variedades de ichu estudiadas y repasar la bibliografía, hemos determinado que tres variedades de ichu *Festuca orthophylla* (hiru ichu), *Stipa ichu* (paja de ichu) y *Festuca dolichophylla* (chilliwa)- son las más notables en estado silvestre. Las otras dos tienen valores nutricionales bajos, salvo la chilliwa, que puede tener niveles de proteína bruta superiores al 8 % de la materia seca en periodos húmedos. En el periodo seco, las concentraciones de proteínas crudas son notablemente bajas, esta variedad de ichu, se caracteriza por sus altos contenidos de fibra cruda (Covarrubias y Peña, 2017).

#### **A. Festuca Orthophylla**

Nombre científico, perteneciente a la familia Poaceae, además su nombre común es Hiru ichu, paja brava, es una hierba perenne, nativa del oeste de Sur América (Perú, Chile, Ecuador, Bolivia y Argentina) (Villarando et al., 2011).

## Figura 1

### *Pajonales de Festuca Orthopylla*



Nota. Villarpando et al. (2011).

Características biológicas: Posee espiguillas florales rectas, que aparecen fines de la primavera y a inicios del verano. Alcanza una altura de 20 a 50 cm y produce racimos de hojas delgadas, ásperas, de color marrón plomizo, erguidas, aciculadas, de 5 a 13 cm de largo y de 1 a 2 mm de ancho. La lema mide 6-7 mm de largo, la inflorescencia es una panícula lineal, de 4,5-6 cm de largo y 6-8 mm de ancho. Dicha especie al madurar se lignifica y se endurece como la chilliwa de manera que las hojas son punzantes y se convierten en verdaderas lanzas que dañan el hocico de los animales tiernos (Villarpando et al., 2011).

Fenología: Florece dos a tres veces al año (Covarrubias y Peña, 2017).

Propagación: En esta especie todas las plantas son femeninas y pueden producir la semilla viable, genética idéntica sin polinización. Su poder germinativo es alto de 88 % (Covarrubias y Peña, 2017).

Características ecológicas: Es ampliamente distribuido en la zona andina, con niveles de humedad relativamente altos, con exposición luminosa y temperaturas medias de 10°C (Covarrubias y Peña, 2017).

Suelos: Suele crecer en suelos rocosos o arenosos a lo largo de las riberas de los ríos del altiplano. También puede prosperar en llanuras temporalmente húmedas y a más de 4000 metros sobre el nivel del mar. Puede crecer en suelos alterados, pizarrosos, doríticos y cuarcíticos. Según

Covarrubias y Peña (2017), puede soportar suelos alterado.

Rango altitud: De 2500 a 4500 msnm (Covarrubias y Peña, 2017).

## B. *Stipa Ichu*

Perteneciente la familia de las gramíneas, conocida como Paja Ichu, se conoce que es una planta de alta montaña a lo largo de las cordilleras americanas desde México a Centroamérica, Colombia, Chile, Perú y Argentina (Covarrubias y Peña, 2017).

### Figura 2

*Variedades de Stipa Ichu*



Nota. Cossios (2018).

- **Características biológicas:** Planta perenne, crece en manojos densos, herbácea, amacollada, erguida y densamente cespitosa, cuyo tallo es de 35 cm a 1,3 m de alto, con más de tres nudos con o sin pelos, entrenudos ásperos al tacto o con pelos, posee unas hojas con vaina glabra, con pelos blancos de  $\pm 1$  mm de largo en el cuello, lígula membranácea de  $\pm 2$  mm de largo, lámina plegada o con los márgenes doblados hacia dentro, áspera al tacto o con pelos en el haz y a veces hispida en los márgenes, de 30 a 60 cm de largo y menos de 4 mm de ancho (Cossios, 2018).
- **Inflorescencia:** Una panícula abierta y densa, blanca o plateada, de 15 a 40 cm de largo, su nudo basal con pelos blancos o café claro, de aprox. 1 mm de largo, con ejes ásperos al tacto (Carrillo, 2002).

- **Espiguilla/Flores:** Glumas hialinas o purpúreas, de 6 a 10 mm de largo y menos de 1 mm de ancho, largamente acuminadas, trinervadas, iguales o la primera un poco más larga que la segunda; lema cilindráceo pubescente, fusiforme, café clara, de 2 a 3,5 mm de largo, con pelos blancos más largos, ápice de la, lema con pelos blancos de 3 a 4 mm de largo, arista de 1 a 2 cm de largo, escabrosa o glabra y flexuosa (Carrillo, 2002).
- **Propagación:** Dispersión y germinación, generalmente se propaga por semillas; los frutos pueden volar a cierta distancia. Tienen un corto periodo de rebrote, permaneciendo seca la mayor parte del año, poseen un ciclo de vida perenne (Carrillo, 2002).
- **Hábitat:** Generalmente dicha especie habita en pajonales de puna, claros de bosques y lugares perturbados, como orillas de caminos, laderas y parcelas, cultivos de alfalfa descuidados, pastizales secundarios, suelos delgados con pH ácido (Carrillo, 2002).
- **Rango altitud:** De 2300 a 3400 msnm (Covarrubias y Peña, 2017).

### C. **Festuca Dolichophylla**

Esta planta, endémica de Bolivia, Chile, Argentina, Colombia, Ecuador y Perú, pertenece a la familia de las poáceas y suele denominarse chilliwa. Estos países tienen páramos, o laderas abiertas cubiertas de ceniza volcánica (Ramos de la Riva, 2011).

### **Figura 3**

*Planta de Festuca Dolichophylla*



*Nota.* Cossios (2018).

- **Características biológicas:** Plantas en matas densas, es una especie botánica gramínea cespitosa, dura, salificada, tiene rizomas no alargados. Tallos floríferos: glabros a escabrosos; 50-90 cm de altura; emergen de tallos vegetativos. Vainas: escabrosas, pajizas, no fibrosas; láminas: 10-20 cm x 0,8-1,4 mm, involuta, constantemente enrollada, con una base profunda, fibrosa, adventicia; lígula: 1,8-2,7 mm, ciliada, con expansiones laterales de hasta 3 mm. Láminas estrechas, algo planas, de 10-35 cm de longitud (Cossios, 2018).
- **Inflorescencia:** Panículas 12-20 x 3-7 cm, abiertas, laxas, algo nutantes; eje escabroso; ramas más inferiores 6-10 cm, solitarias o pareadas, ascendentes a patentes, desnudas en el 1/2 inferior. Espiguillas multiflora de 9 a 10 mm de largo, lanceolada, 1 nervada, la superior mayor a 5,5 mm de largo, 3 nervadas; glumas agudas más cortos que la lemma, desiguales, la inferior 4 mm de largo y la superior de 5,7 – 6,2 mm; lemmas de 6 – 7,2 mm de largo ligeramente aristada o acuminada, escabrosas, diminutamente 2-denticuladas, las aristas 0,1-1 mm; anteras 2,6-3,3 mm; ovario glabro (Cossios, 2018).
- **Fruto:** Cariópside (Ramos de la Riva, 2011).
- **Propagación:** Una variedad de ichu muy resistente a las inclemencias meteorológicas, incluidas las tormentas de granizo y las heladas. El trasplante es una técnica muy útil para la reproducción vegetativa ya que, a diferencia de la reproducción sexual, se pueden producir plantas vigorosas en el menor tiempo posible mediante germinación, emergencia y crecimiento, normalmente en tres años (Ramos de la Riva, 2011).
- **Hábitat:** Generalmente, esta variedad de ichu habita en pastizales de puna, suelos profundos, algo húmedos y con pH neutro, en suelos de textura media y pesada (Ramos de la Riva, 2011).
- **Rango altitud:** De 3400 a 4500 msnm (Ramos de la Riva, 2011).

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Internacionales

Parihar et al. (2020) en su artículo, planificaron explorar el potencial de bioacumulación de 23 especies de plantas a través del factor de bioacumulación (BAf), índice de acumulación de metales (MAI), potencial de translocación (Tf) e índice de bioconcentración integral (CBCI) para siete metales pesados (cadmio, cromo, cobalto, cobre, hierro, manganeso y zinc), entre las plantas estudiadas se encontraba la *Cannabis sativa* L. Se determinaron efectos fitotóxicos en las plantas, factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT). Los tejidos presentaban distintos órdenes de acumulación de metales, siendo la raíz la que mostraba las mayores concentraciones de metales. Los valores del FBC para el Cd en *C. sericea* y superiores a 1 para el Hg se encontraron en las cuatro especies evaluadas. Con la excepción de los tratamientos de control (CT) para *S. rhombifolia* y *C. sericea*, se encontró que el Pb presentaba valores de BCF y TF < 1. En cuanto al Cd, *S. obtusifolia*, *S. rhombifolia* y *A. spinosus* mostraron un FBC y un FT >1. Las máximas reducciones de biomasa y área foliar (superiores al 90 %) se presentaron para *A. spinosus*. De esta manera, las especies evaluadas tienen potencial de ser utilizadas para remediar suelos mineros mediante las técnicas de fitorremediación (fitoextracción o fitoestabilización), según corresponda la especie y el metal.

Ricapa (2020) en su trabajo de investigación sobre “Análisis de absorción de metales en la planta *Stypa ichu* en las zonas no disturbado y disturbado del suelo de la Laguna Yanamate-Pasco” concluyó que las muestras de la planta *Stypa ichu* es capaz de adaptarse a cualquier suelo contaminado por metales pesados. Que a su vez muestra que hay un alto contenido de Sodio “Na” y Cobre “Cu”. Existe una correlación entre la cantidad de metales pesados en el suelo y la capacidad de absorción de las plantas de *Stypa ichu*. Además, se demostró que las hojas y los tallos de *Stypa ichu* absorben más Na, Cd, Pb y Cu en las regiones perturbadas que en las no perturbadas. Por el contrario, en las regiones no perturbadas, las hojas de *Stypa ichu* absorben más Ca, Mg, Fe, Zn y Mn que en las zonas perturbadas. Por otra parte, el potasio “K” tiene un mismo valor de adsorción en la zona disturbada y no disturbada. La capacidad de la influencia de

la absorción de la planta del *Stypa ichu* se ven correlacionado a la concentración de metales pesados en el suelo.

Zapata (2019) en su tesis de contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura indica que en el caso de la mina Turmalina al no realizar un correcto cierre de operaciones los pasivos ambientales mineros fueron contaminando los suelos y aguas, afectando principalmente a la población de Canchaque. Los resultados de su investigación no se han podido comparar con los obtenidos en el artículo científico Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru porque se analizaron diferentes especies vegetales en cada investigación; sin embargo, los valores obtenidos por el Dr Bech son más altos que los obtenidos en su tesis. Ambas investigaciones contribuyen a comprender cómo algunas plantas autóctonas de zonas de gran altitud son capaces de absorber metales pesados. Se ha descubierto que cada planta desarrolla estrategias de tolerancia y selección de metales propias de su especie y que las cantidades de metales pesados que absorben dependen de las condiciones que modifican su disponibilidad, como el pH y la conductividad eléctrica del suelo. Las precipitaciones elevadas y los suelos lixiviados están relacionados con la acidez. Dado que los metales pesados comienzan a disolverse en el suelo húmedo y se vuelven accesibles a las plantas, restringe su desarrollo. El bajo pH del suelo tiene un impacto significativo, sobre todo en metales como el cobre, el manganeso, el hierro y el aluminio, cuya disponibilidad aumenta con la disminución del pH. Sin embargo, la conductividad eléctrica analiza la concentración de sales solubles en la solución del suelo aprovechando la capacidad de las sales para conducir la corriente eléctrica. El resultado es una medida de la capacidad del suelo para conducir la electricidad.

Barba et al. (2017) en su investigación, tienen como propósito determinar las concentraciones de metales pesados, específicamente, Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Manganeso, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc; en los ríos Auqui y Paria, de la región Ancash, del Perú para hacer una comparación con los límites máximos permisibles establecidos, por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Se elaboró un plan de muestreo espacial y temporal para obtener muestras representativas. Específicamente, se tomaron muestras en cinco lugares diferentes-1000 m y 500 m aguas arriba del punto de captación, en el punto de

captación, en la entrada y salida de la planta de tratamiento-tres veces durante cada una de las cuatro (4) estaciones (invierno, primavera, verano y otoño). De acuerdo con la respuesta recibida, la concentración de manganeso en el río Auqui es superior a la cantidad máxima permitida (0,5 mg/L), y existen evidencias en el río Paria que sugieren que las concentraciones de metales pesados son inferiores a las cantidades máximas permitidas. Estos resultados sugieren que el agua es segura para el consumo humano.

Panduro y Soria (2015) en su tesis, plantean como objetivo evaluar el contenido de metales (plomo, cadmio) presentes en las especies vegetales de *Myrciaria dubia* (Kunth) Mc. Vaugh y *Cajanus cajan* (L) Huth que se expenden en el centro herbolario “Pasaje Paquito”. El estudio es de enfoque cualitativo de tipo descriptivo de diseño experimental. En los resultados obtenidos, ninguna de las especies estudiadas supero los límites de plomo de 10  $\mu\text{g/g}$ . Las concentraciones medias en las tres muestras de *Myrciaria dubia* (Kunth) Mc. vaugh son inferiores a los límites de detección con menos de 0,05  $\mu\text{g/g}$ , mientras que los valores medios en las muestras de *Cajanus cajan* (L) Huth son superiores a 0,310  $\mu\text{g/g}$ . *Myrciaria dubia* (Kunth) Mc. vaugh se encontraron concentraciones medias de cadmio por debajo de los límites de detección  $< 0,001 \mu\text{g/g}$  en el caso de los límites de cadmio permitidos por la OMS para las hierbas medicinales; por otro lado, los resultados de *Cajanus cajan* (L) Huth, con una concentración media de 0,156  $\mu\text{g/g}$ , no superaron estos límites.

Panduro y Soria (2015) en su tesis, ha comprobado que los suelos de la ciudad de La Oroya que están frente al complejo metalúrgico están impactados con plomo sobrepasando en muchos casos los 1200 mg/Kg. que es el estándar de calidad para suelos industriales comerciales y extractivos y superando en todo sentido el estándar de calidad del suelo peruano para vivienda que es de 140 mg/Kg. Las precipitaciones están correlacionadas con una influencia del suelo al río, como lo demuestra la concentración de plomo del río Mantaro, que supera los 0,05 mg Pb/L durante las estaciones húmedas (el requisito de calidad del agua para el riego y el agua de bebida de los animales). La capacidad de dilución del río Mantaro permite que la concentración de plomo descienda a menos de 0,01 mg/L durante los periodos secos, aunque cada aguacero causa daños medioambientales.

Graza y Quispe (2015) en su estudio, realizó la cuantificación de arsénico, cadmio y plomo en el río Santa en el tramo adyacente al Pasivo Ambiental Minero de Recuay, Ticapampa. Las muestras de agua se recogieron en nueve (09) puntos consecutivos, que también se componen de tres (03) objetivos (el objetivo itinerante, el objetivo de muestreo y el objetivo del lago). Se utilizó la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica para analizar la concentración de los metales especificados en cada punto. Los niveles de plomo (0,6402 mg/L), cadmio (0,0396 mg/L) y arsénico (0,404 mg/L) estaban todos por encima de los Límites Máximos Permisibles. El estudio comprueba que parte de la contaminación del río es provocada por la descarga residuos mineros. En cuanto al análisis de los sedimentos, las lecturas del contenido de metales pesados se sitúan en niveles que, según los límites permitidos, indican diversos grados de toxicidad. Tras la investigación, se descubrió que el agua del río Santa estaba contaminada y no era apta para el uso humano.

Munive et al. (2018) en su artículo científico, plantean el objetivo de reducir la contaminación por metales pesados de los suelos, observaron el efecto de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost de Stevia). El presente trabajo se realizó utilizando el maíz como planta fitorremediadora. Se utilizaron suelos agrícolas que contenían las mayores cantidades de plomo (Pb) y cadmio (Cd) y que superaban los Estándares de Calidad Ambiental (SQE) del Perú. Las mayores concentraciones de Pb y Cd en los suelos tuvieron efectos perjudiciales sobre el rendimiento de las hojas, los tallos y las raíces del maíz, así como un retraso del crecimiento. La mayor concentración de plomo y cadmio en las raíces de maíz indica que el cultivo absorbe metales pesados del suelo; este hallazgo apoya la idea de que las enmiendas orgánicas ayudan a solubilizar el plomo y el cadmio del suelo. Sin embargo, el vermicompost de stevia fue superior a la hora de extraer metales pesados del suelo. Los cálculos del factor de translocación (FT) y del factor de bioconcentración (FBC) muestran que el maíz es una planta excluyente o estabilizadora.

Ríos (2017) en su investigación, tiene como objetivo comparar las eficiencias fitorremediadoras de las especies en la reducción de la concentración de plomo del suelo; se trajeron 31 kg de tierra en donde se analizó una muestra, registrando una concentración de plomo inicial de 402,8 mg/kg sobrepasando los

Estándares de Calidad Ambiental para suelo. Se examinaron el Pb, el pH, la CE, la CIC y la textura del suelo, junto con las concentraciones de plomo en las secciones radicular y aérea, que incluyen las raíces de rye grass, geranio y malva, así como los tallos y las hojas de geranio y rye grass. Las muestras de las tres réplicas se obtuvieron tras 29, 48 y 70 días de exposición al tratamiento, y se enviaron al laboratorio para medir el pH, la CE y las concentraciones de plomo en el suelo y las especies. Comparando las concentraciones iniciales y finales, se analizaron los resultados, y las eficiencias de reducción del plomo para la hierba de centeno fueron del 75 %, para el geranio del 69 % y para el malvavisco del 68 %.

Venegas (2016) en su investigación titulado “Capacidad de Extracción de la Especie *Stipa ichu* en los Pasivos Ambientales Mineros en la Planta Concentradora de Huari – La Oroya de la UNCP” que la contaminación de la zona de Huari - La Oroya, impactado por los pasivos ambientales (plomo), generado por la concentradora de Huari, perteneciente a la Universidad Nacional del Centro del Perú, es un problema que se incrementado con el paso de tiempo, con la contaminación del Rio Mantaro y que este es dispensador de agua al Valle del Mantaro. Las grandes regiones no pueden tratarse con métodos físico-químicos convencionales porque son demasiado costosos. Por ello, investigar plantas que prosperen en zonas contaminadas se ha convertido en una opción rentable y asequible. Las plantas vegetales ofrecen diversos métodos para limpiar el suelo; uno de ellos es la planta *Stipa Ichu*, que demostró ser la que mejor absorbe el plomo en la zona investigada. Existen seis vías de absorción en la fitorremediación; sin embargo, la investigación experimental se centró únicamente en el mecanismo de fitoextracción probado sobre el terreno.

Hoyos (2014) tiene como objetivo determinar la concentración de plomo y cadmio por bioacumulación en *Brassica oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *Raphanus sativus* L., regadas con aguas a diferentes concentraciones de cada metal. Para ello trabajaron con 20 plantas de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L., con 14 días de desarrollo vegetativo, trasplantadas aleatoriamente y de forma individual en pozas experimentales con suelo homogenizado franco arenoso libre de metales plomo y cadmio (ibid., pág. 70). Éstas, asimismo, fueron sometidas a tratamientos de 0, 150 y 300 mg/L de cada

metal con 4 repeticiones durante 60 días, se recolectaron muestras de suelo, raíz y parte aérea de cada especie vegetal para los análisis correspondientes de plomo y cadmio por espectrofotometría de absorción atómica Perkin Elmer. Los resultados con un nivel de confianza del 95 % refieren que en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., en la raíz de *R. sativus* L., y en el suelo donde fueron cultivadas, existe diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones de plomo y cadmio de un tratamiento a otro. Se concluye, por tanto, que en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., y en la raíz de *R. sativus* L., el plomo y el cadmio se bioacumulan con mayor concentración en soluciones de 300 mg/L, lo que demuestra que existe una relación direccional ascendente con las soluciones concentradas de los diferentes tratamientos.

Olivares et al. (2013) reportan los niveles de Cu, Pb, Cd y Zn en suelos y plantas nativas cultivadas de una zona altamente urbanizada de la ciudad de La Habana. En los años 2006 y 2007, investigaron 17 granjas urbanas situadas a dos kilómetros del vertedero de la "calle 100". Recogieron muestras del suelo, así como de toda la verdura cosechada. Las concentraciones de los siguientes metales pesados variaban en los suelos agrícolas: Zn (44,1-294,7 mg/kg), Pb (18,1-138,5 mg/kg), Cu (38,4-81,3 mg/kg) y Cd (0,24-2,1 mg/kg). Los suelos de algunas fincas (35 y 52 %, respectivamente) presentan niveles de zinc y plomo superiores a los típicos de los suelos agrícolas en Cuba. En cuanto al plomo, el 23 % de los suelos presentaban niveles superiores a determinados umbrales de las normas internacionales, incluidos los considerados fitotóxicos. En el 12,5 % de las muestras de hortalizas recogidas se superaron los niveles máximos permitidos de este contaminante en productos destinados al consumo humano establecidos por la norma cubana. Los resultados apuntan a la necesidad de vigilar de cerca la producción de hortalizas de la zona.

Astete et al. (2009) en el artículo titulado "Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros" tuvieron como objetivo determinar los niveles de plomo y otros problemas de salud en menores de 10 años residentes en las comunidades de Quiulacocha y Champamarca en Pasco. En el diseño de la investigación, transversal y aleatoria, se incluyó a todos los habitantes de la zona que vivían cerca de los vertederos de la mina. Según los resultados, había una prevalencia del 84,7 % de intoxicación

por plomo, una media del 55,8 % de contenido de plomo en las muestras de sangre de los niños de ambos pueblos, un 23 % de anemia, un 5,9 % de retraso mental y desnutrición crónica en los niños de ambos grupos. Sin embargo, la investigación también muestra que el 85,4 % de los niños de Champamarca y el 79,2 % de los de Quiulacocha tenían un desarrollo psicomotor normal. Llegó a la conclusión que cuatro de cada cinco niños, de estas comunidades, tiene intoxicación plúmbica y que la fuente de contaminación por plomo para los niños que viven en zonas aledañas son los relaves mineros, por lo que, demanda realizar intervenciones en estas comunidades.

### 1.2.2 Nacionales

Cercado y Ramos (2021) mediante su trabajo de investigación “Estudio de las Especies Vegetales Bioacumuladoras de Arsenico, Cadmio y Plomo Emergentes en Areas Mineras Altoandinas Del Perú” indicaron que en el análisis de 24 especies de plantas emergentes en áreas de influencia minera en zonas altoandinas a nivel nacional, que se ubican por encima de los 3000 msnm. El estudio incluyó un análisis de la acumulación total (raíz, tallo y hojas) de As, Cd y Pb en especies vegetales reportadas en siete estudios nacionales que cumplieron con los criterios de selección, los cuales incluyeron ser especies emergentes en zonas afectadas por actividades o pasivos mineros, ser especies altoandinas y presentar la concentración de los tres metales dentro de la investigación. Seis clases, once órdenes y trece familias comprenden las especies analizadas. La clase más representada es Magnoliopsida, el orden más representativo es Poales, y la familia más representativa es Poaceae. En los siete ensayos examinados, *Lachemilla procumbens* Andina presentó la mayor concentración de arsénico (7787,8 mg/kg), seguida de *Polytrichum juniperinum* (3246,7 mg/kg) para el plomo, y *Lachemilla orbiculata* (266,2 mg/kg) para el cadmio. Dado que Poaceae tiene el mayor número de especies que bioacumulan As, Cd y Pb, fue la familia que mostró ser la más prometedora para futuras investigaciones sobre este tema. La investigación realizada en el departamento de Cajamarca reveló que las plantas tenían los mayores niveles de metales pesados.

Huayllani (2018) concluye en su trabajo de investigación que el *Stipa ichu* tiene un buen potencial para el uso de la Fitorremediación, observo que en la

primera muestra el *Stipa ichu* ya había reducido en un 12,32 mg/kg la concentración respecto a la muestra inicial de plomo, además la exposición del *Stipa ichu* ante los metales pesados no afectó su crecimiento, no afectó el grosor ni color de la planta, dando como un indicativo que esta especie es muy resistente y efectiva para la absorción de plomo (Pb) y Zinc (Zn) en suelos contaminados.

Cahuana y Aduvire (2019) en cuanto a la acumulación de metales pesados en el tejido vegetal, se tiene que el elemento Mercurio (Hg) estuvo ausente y no detectables en el caso de algunas estaciones de muestreo. Del método analítico empleado detecto las concentraciones de mercurio por encima de los límites máximos permisibles, las macrofilas acumulan con facilidad metales como Zinc (Zn), Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) y en menor concentración el Plomo (Pb). Los niveles de arsénico (As) encontrados en las muestras de tejido vegetal recogidas en algunas estaciones de muestreo dentro de la esfera de influencia de Environmental Mining Liabilities son superiores a los encontrados en los límites de detección (LD=0,05) del método analítico del laboratorio; sin embargo, estos niveles siguen estando por debajo de la concentración máxima permitida por la AAFCO (400 mg/kg). Este hallazgo indica que los niveles de arsénico (As) en las especies palatables (*Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* y *Cortaderia sp.*) están dentro de los límites permitidos por la AAFCO (1996), lo que significa que no suponen una amenaza o riesgo peligroso para el ganado o los animales autóctonos. No obstante, estos datos demuestran que las cantidades de (As) detectadas con (6,5 mg/kg) son superiores al contenido máximo permitido (2 mg/kg) si se compara con la normativa de la Unión Europea (Real Decreto 747/2001. España). La existencia de pasivos ambientales mineros puede ser la causa de este aumento de concentración; no obstante, esta cifra está muy por debajo de la concentración límite de la AAFCO (400 mg/kg). Las concentraciones de mercurio (Hg) en muestras de tejido vegetal obtenidas en todas las estaciones de muestreo del área de influencia de los pasivos ambientales mineros presentan valores inferiores a las concentraciones máximas establecidas por la Unión Europea (0,1 mg/kg. Real Decreto 747/2001. España), así como a los límites máximos de la AAFCO (10 mg/kg) (1996). Por lo tanto, estas concentraciones probablemente no causarían efectos biológicos adversos a la biota terrestre.

Campos (2018) postula que la posible causa de la presencia de los metales en las aguas de la Cuenca Llallimayo podrían ser las actividades humanas de la "Empresa Minera ARUNTANI SAC." Es importante señalar que la geología del área circundante a la "Empresa Minera ARUNTANI SAC." muestra un depósito epitermal disperso con una alta sulfuración, junto con rocas volcánicas de origen volcánico y rocas volcánicas cortadas por brechas hidrotermales. Estas rocas están concentradas principalmente en óxidos de hierro, que actúan como alimentadores de oro para el cuerpo mineralizado, lo que explica que tengan altos valores naturales de sulfatos, pH ácido y metales pesados. Los parámetros físicos OD y PH en los puntos monitoreados de la Cuenca de Llallimayo exceden el Agua ECAS, y los parámetros químicos Al, Cu, Fe, y Mn exceden el Agua ECA de Categoría 3. Estos resultados sugieren que las aguas de la Cuenca de Llallimayo están contaminadas y no deben ser utilizadas para consumo humano o animal ni para riego de hortalizas de tallo alto y bajo.

Carbajal y Quispe (2019) en su estudio, plantean como finalidad evaluar la capacidad de bioacumulación de plomo y cromo de relave minero usando la especie. Para analizar los niveles de metales pesados en las plantas se utilizó el espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente de la Escuela de Ingeniería Medioambiental. Los resultados muestran que, en lo que respecta a la bioacumulación de metales pesados, las hojas acumularon la mayor cantidad de Cr y las raíces concentraron la mayor cantidad de Pb. El tratamiento T3 presentó las mejores condiciones de fitoextracción, con las hojas acumulando 23,35 mg/kg MS de Cr y las raíces concentrando 8 mg/kg MS de Pb. Los resultados implican que el sustrato orgánico utilizado puede ser una opción favorable para el crecimiento y mejora de *Brassica juncea* en la fitoextracción de suelos contaminados, potenciando su capacidad de acumulación, teniendo en cuenta su capacidad para acumular metales.

Tintaya (2018) en su investigación, tiene como propósito evaluar la capacidad fitorremediadora de la Especie. Como parte de los objetivos del estudio, se evaluó el impacto de *Helianthus annuus* en las variaciones del pH, la conductividad eléctrica, la masa vegetal, el crecimiento de la especie y las concentraciones de Cr y Pb total en el suelo, la materia seca vegetal y la materia seca vegetal. Según la conclusión de la evaluación, la aplicación de enmiendas en

los tratamientos T3 y T4 favorece la bioacumulación de Pb (75,54 ppm en T3 y 46,09 ppm en T4), Pb en la planta (50,70 ppm Pb en T3 y 41,30 ppm Pb en T4), Cr (47,40 ppm Cr en T3 y 79,5 ppm Cr en T4) y Cr en la especie vegetal (9,21 ppm Cr en T3 y 19,3 ppm Cr en T4). *Helianthus annuus* mostró un alto porcentaje de supervivencia (masa vegetal, crecimiento) en T3 y T4, así como mayores niveles de bioacumulación de plomo y cromo en general.

### 1.2.3 Locales

Choquepata (2018) realizó un estudio sobre la determinación de metales pesados en leche y pelo de vacas de la cuenca del río Llallimayo concluyendo que el promedio de concentración de mercurio era de 0,0138 mg de Hg/kg de pelo en vacas pastoreadas en pastos regados con agua del río de la cuenca Llallimayo contaminada por actividad minera. En cuanto al mercurio, los resultados del estudio superaron el nivel máximo permitido. Los límites permitidos fijados por la Unión Europea establecen que no está permitida la leche que contenga más de 0,01 mg/kg de mercurio. En las muestras de leche de vacas alimentadas con hierba regada con agua de la cuenca del río Llallimayo, la cantidad media de mercurio es de 0,0022 mg Hg/kg. No obstante, las concentraciones de mercurio encontrados no superan los límites máximos permisibles, según los estándares de la Unión Europea, quien indica que los valores de mercurio no deben ser mayores a 0,005 mg/kg de leche, también indica que estos resultados obtenidos para el mercurio podrían ser porque este metal pesado ingresa al organismo a través de los alimentos se absorbe del 90 al 95 % en el tracto gastrointestinal asimismo es hidrosoluble y liposoluble lo que contribuiría en su almacenamiento en los tejidos del animal y el hombre, por lo cual su liberación es muy lenta.

Curasi (2019) en su investigación, establece como objetivo evaluar la concentración de metales pesados en la planta de *Baccharis sp.* La metodología consistió en coleccionar plantas de *Baccharis sp.*, las que fueron rotuladas, empaquetadas y enviadas a los Laboratorios, para determinar la concentración de metales pesados en raíces y hojas. Las cifras de 48,60 y 52,00 mg/kg, respectivamente, mostraron que *Baccharis sp.* bioacumulaba arsénico en sus hojas y raíces. En comparación con las plantas de la zona directa, que sólo registraron 36,47 mg/kg de zinc, las plantas tomadas en la zona indirecta tuvieron más zinc



bioacumulado en sus hojas, alcanzando los 59,60 mg/kg. Se determina que las plantas de *Baccharis sp.* son capaces de absorber metales pesados, y que su capacidad para hacerlo está influenciada por el pH y la cantidad de materia orgánica presente en sus tejidos.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

Aunque el exceso de elementos minerales en el suelo de un ambiente determinado puede tener un origen natural, de tipo geológico o biótico (acumulación de desechos orgánicos), o un origen antrópico, representado por diversas actividades industriales; actualmente el aumento de elementos tóxicos en los sustratos debido a actividades humanas se está volviendo cada vez más importante, por la rapidez con que se liberan grandes volúmenes de éstos al ambiente (Ginocchio y Baker, 2018).

De todas las actividades industriales, la minería metálica ha sido una de las más contaminantes y una de las más perjudiciales para el medio ambiente, ya que genera un gran volumen de desechos sólidos y líquidos (relaves) como es en el caso de las unidades mineras colindantes a la cuenca Llallimayo que, a partir de los procesos de concentración del mineral, los cuales son acumulados en forma permanente en grandes embalses. Los relaves están constituidos por material particulado rico en elementos tóxicos como son los metales pesados (As, Cu, Pb, Zn, Hg) y las sales, lo que las hace altamente contaminantes las fuentes de agua y el suelo alrededor de ellos, afectando a la población de esa zona en temas directamente relacionados a la salud y desarrollo socioeconómico basado en la ganadería.

La ausencia completa de suelo fértil y el desbalance de nutrientes (altas concentraciones de metales pesados y bajo contenido de materia orgánica), a menudo combinado con un pH muy bajo, hacen de las arenas de relave un sustrato altamente desfavorable para la vida vegetal, limitando el establecimiento de las plántulas y crecimiento de la mayoría de las especies vegetales (Ginocchio y Baker, 2018).

Sin embargo, investigaciones realizadas en diversas regiones del mundo han documentado la ocurrencia de procesos de revegetación natural extremadamente lentos, sugiriendo que ciertas especies vegetales son capaces de establecerse en estos ambientes; la razón de la existencia de estas especies vegetales puede atribuirse a su resistencia a niveles elevados de metales pesados. El río Llallimayo presenta una anomalía con diferentes coloraciones, los suelos estériles de la cuenca del río Llallimayo, presentan este fenómeno, lo que plantea las siguientes preguntas.

## 2.2 Enunciados del problema

### 2.2.1 Problema general

- ¿Cuál es la capacidad del “ichu” (*Stipa ichu*) como bioindicador de As y Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo?

### 2.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué cantidad de As es absorbida por la variedad *Stipa ichu* en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo?
- ¿Qué cantidad de Hg es absorbida por la variedad *Stipa ichu* en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo?
- ¿Qué riesgos se presenta en la zona por la presencia de As y Hg?

## 2.3 Justificación

Las investigaciones referidas a considerar bioindicadores a la flora nativa presente en los relaves mineros que actualmente son considerados una gran problemática ambiental en toda la cuenca del río Llallimayo son escasas y no muy convencionales. Se puede sostener que el proyecto de investigación que se pretende ejecutar es un alcance desde una nueva perspectiva de evaluar los efectos ambientales que producen los relaves mineros y dar una nueva herramienta de medición correspondiente a un monitoreo geobotánico que se debería considerar con respecto al desempeño ambiental de la industria minera puesto que muchas veces solo se toma en referencia los monitoreos de aguas y suelos de manera independiente, mas no viendo la relación de ellos frente al desarrollo de la flora en las zonas circundantes que básicamente son un resultado de la interacción entre los factores bióticos y abióticos.

La investigación realizada se focaliza en los efluentes de la actividad minera en la cabecera de la cuenca del río Llallimayo puesto que es actualmente una zona que viene siendo fuente de bastantes conflictos sociales por parte de la población que viene sufriendo grandes impactos en sus actividades por la presencia de efluentes mineros que van uniéndose a otras fuentes de agua que usan los pobladores para su actividad agrícola y ganadera, los cuales han ido disminuyendo cada vez observándose pérdidas de terreno agrícola, muerte de especies nativas y enfermedades que afectan a los animales domésticos base de la economía de la zona.

Por otra parte, la investigación contribuye a mejorar mediante la inclusión de un monitoreo geobotánico la identificación y presencia de metales pesados como el arsénico y mercurio los cuales pueden ejercer efectos tóxicos y ya no solo ser un tema de monitoreo ambiental sino también pasar a un tema de riesgo a la salud pública.

Los resultados del estudio ayudarán a cuantificar mejor los niveles actuales de contaminación de la zona y añadirán una variable a las preocupaciones que rodean a la evaluación medioambiental. Además, sensibilizarán a los agentes implicados en la actividad minera y a las organizaciones de vigilancia ambiental, dándoles otro factor a tener en cuenta a la hora de evaluar los impactos ambientales. El trabajo también tiene valor metodológico, ya que podría servir de base para otros estudios que utilicen enfoques complementarios para realizar análisis cooperativos que respalden estos retos medioambientales.

## 2.4 Objetivos

### 2.4.1 Objetivo general

- Evaluar la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) como bioindicador de As y Hg presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.

### 2.4.2 Objetivos específicos

- Identificar la capacidad de bioindicador de As respecto a la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- Identificar la capacidad de bioindicador de Hg respecto a la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- Realizar una evaluación de riesgos por la presencia de As y Hg en las aguas y zona de influencia de los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.

## 2.5 Hipótesis

### 2.5.1 Hipótesis general

- La variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) es un bioindicador de As y Hg presente en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.

### 2.5.2 Hipótesis específicas

- H1: La variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) es un bioindicador de As en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- H0: La variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) no es un bioindicador de As en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- H2: La variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) es un bioindicador de Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- H0: La variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) no es un bioindicador de Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- H3: En la evaluación de riesgos por la presencia de As y Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo presenta una valoración como RIESGO ALTO.
- H0: En la evaluación de riesgos por la presencia de As y Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo no presenta una valoración como RIESGO ALTO.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y METODOS

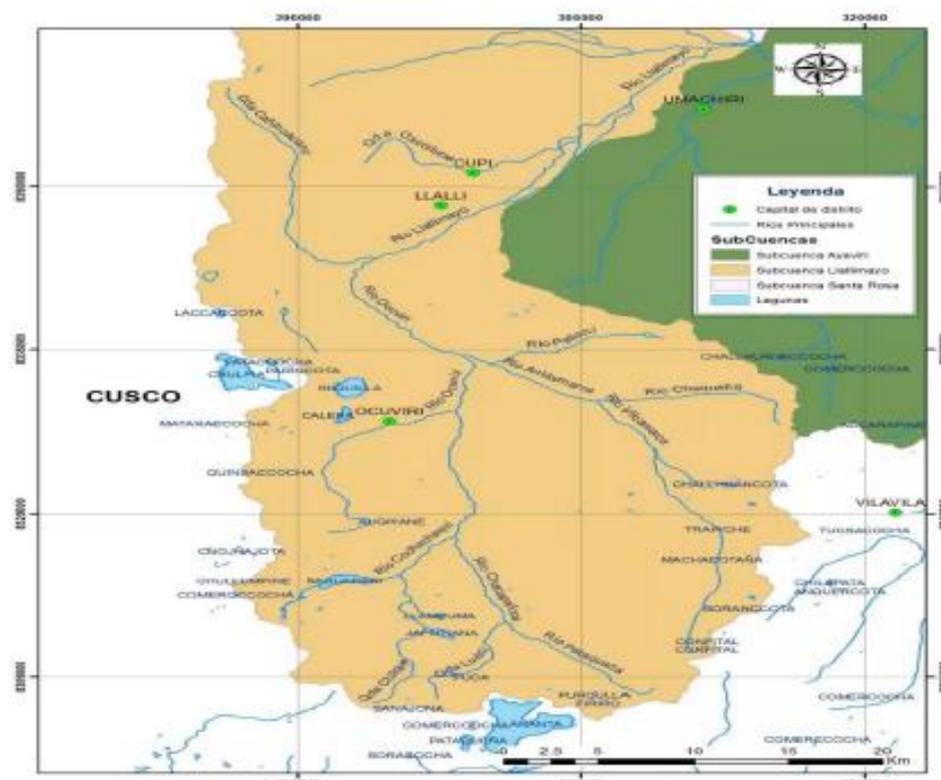
#### 3.1 Lugar de estudio

La zona de estudio ambiental se sitúa en la Región Puno, en la cuenca del río Llallimayo, que nace del río Azufrini (del cual es afluente la quebrada Luchusani) y se convierte en el río Chacapalca antes de unirse al río Ocuviri cerca del distrito de Llalli.

Dicho ámbito de estudio comprende la flora correspondiente a la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) que se encuentra ubicada en coordenadas 15°06'06" S y 70°52'32" W a una altitud de 4261 m.s.n.m.

#### Figura 4

Ubicación geográfica de la cuenca Llallimayo



Nota. Adaptado de Google Hearth (2023).

### 3.2 Población

La población de estudio está constituida por la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) presente en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.

### 3.3 Muestra

La muestra de estudio está constituida por las agrupaciones presentes de “ichu” (*Stipa ichu*) de las cuales se consideró el promedio de 10 muestras de la orilla del río considerándose la concentración inicial (Fuente) y el promedio de 10 muestras alrededor de la zona en un área de 6 metros a la orilla del cuerpo de agua representando la concentración final (Zona de influencia directa) (Ver figura 5 y Anexo 2), en el periodo de tiempo de investigación comprendido entre marzo y noviembre del 2021.

#### Figura 5

*Río Llallimayo donde se extrajeron las muestras de Stipa Ichu*



**Tabla 3**

*Codificación de muestras y ubicación por coordenadas*

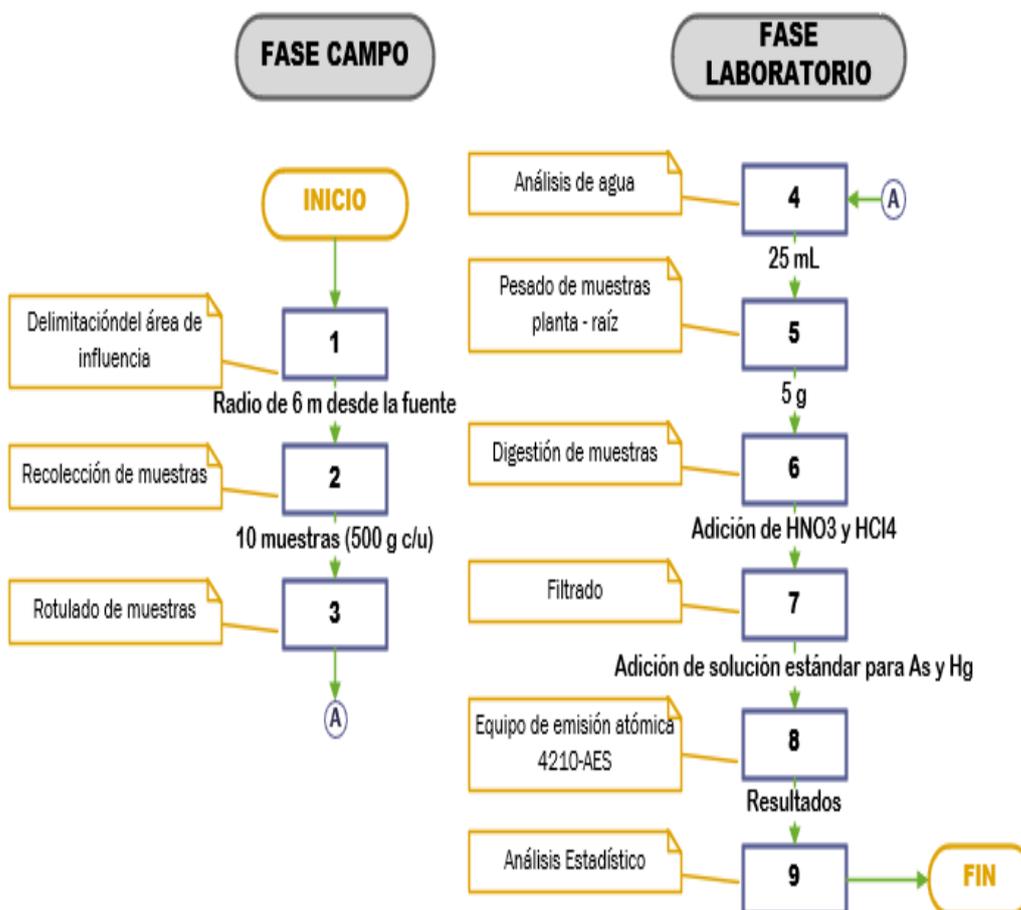
<b>Código (Fuente)</b>	<b>Coordenada UTM de punto de muestreo</b>	<b>Código (Zona de influencia)</b>	<b>Coordenada UTM de punto de muestreo</b>
A	15°06'07''S 70°52'41''W	<b>A</b>	15°06'06''S 70°52'32''W
B	15°06'07''S 70°52'41''W	<b>B</b>	15°06'06''S 70°52'33''W
C	15°06'07''S 70°52'40''W	<b>C</b>	15°06'06''S 70°52'34''W
D	15°06'07''S 70°52'33''W	<b>D</b>	15°06'07''S 70°52'35''W
E	15°06'07''S 70°52'35''W	<b>E</b>	15°06'07''S 70°52'36''W
F	15°06'07''S 70°52'35''W	<b>F</b>	15°06'07''S 70°52'37''W
G	15°06'07''S 70°52'36''W	<b>G</b>	15°06'07''S 70°52'37''W
H	15°06'07''S 70°52'37''W	<b>H</b>	15°06'07''S 70°52'38''W
I	15°06'08''S 70°52'37''W	<b>I</b>	15°06'08''S 70°52'38''W
J	15°06'08''S 70°52'37''W	<b>J</b>	15°06'08''S 70°52'39''W

### 3.4 Método de la Investigación

La metodología de investigación abarca 2 fases que pueden resumirse en el siguiente diagrama para en lo posterior desarrollarlos independientemente.

Figura 6

Diagrama del desarrollo de la metodología de investigación



#### 3.4.1 Fase de campo

Se tomó de referencia la guía de muestreo del Instituto Geográfico Agustín Codazi “IGAC” (Ver anexo 5) para recolección de 10 muestras no probabilísticas a diferentes distancias y por triplicado al borde del río Llallimayo para considerarlas como concentración inicial de la fuente y 10 muestras a una distancia de 6 metros desde el borde del río para obtener datos de la concentración final (Ver anexo 2), adicional a ello se tomó una muestra de agua de la zona influenciada directamente con los relaves mineros para determinar el dato de

control de concentración teniendo de referencia el protocolo nacional de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales (ANA).

- Cada muestra no probabilística incluye una parte vegetal incluida la raíz.
- Inicialmente se requirió tomar una muestra de agua de 1000 ml directamente del río Llallimayo.
- Seguidamente demarcar el área de influencia entre el río y 6 metros a la zona de influencia, colocando cada punto de muestreo con las letras A, B, C, D, E, F, G, H, I y J en color negro las correspondientes a la concentración inicial que es la vegetación ubicada a la orilla del río y en color rojo las que corresponde a la concentración final en zona de influencia directa.
- Posterior a ello recolectar 500 g de cada muestra.
- Finalmente rotular y etiquetar para su trazabilidad en laboratorio.

#### **3.4.2 Fase de laboratorio**

Las muestras de la especie vegetal *Stipa Ichu*, así como el agua fueron trasladadas a los Laboratorios de la facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano (UNAP), para su respectivo análisis de metales pesados mediante el equipo de Espectrofotometría de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210MP-AES, tomando como referencia el protocolo de métodos de análisis de la Universidad de Concepción – Chile (Ver anexo 6); asimismo se internó una contra muestra al laboratorio para su análisis de contraste.

Los pasos para el análisis se desarrollaron en el siguiente orden:

- Primeramente, separar las muestras para ir desarrollando los análisis de manera diferenciada.
- Para la muestra de agua recolectada se realizó la calibración de la curva para detección de Arsénico y Mercurio correspondiente a 0; 2,5; 5 y 10 ml de solución Estándar para posterior a ello tomar los datos directamente en el equipo de Espectrofotometría de Emisión Atómica 4210MP-AES.
- Para las muestras vegetales se tomó una muestra de 5 gramos y se colocó en un vaso de precipitado.
- Seguidamente adicionar 25 ml de ácido nítrico al 100 % calentar hasta 140 °C hasta obtener un volumen de 5 ml posteriormente enfriar hasta 60 °C.

- Agregar cuidadosamente 5 ml de ácido perclórico al 70 % y digerir durante 30 min, repetir el procedimiento de digestión para cada muestra.
- Filtrar y adicionar los indicadores de metales a analizar en fioles de 10 ml, colocando 2,5, 5.0 y 10 ml de indicador para obtener la curva patrón de los metales a analizar.
- Una vez realizadas las curvas de calibración de los patrones, se procedió a analizar cada muestra en el equipo de Emisión Atómica 4210MP-AES.

### 3.4.3 Análisis estadístico

Los datos que se obtuvieron mediante los análisis fueron sistematizados para determinar su grado de correlación mediante test Shapiro-Wilk (Ver anexo 7) para posterior a ello validar las hipótesis.

### 3.4.4 Análisis de riesgos

Para la metodología de análisis de riesgos se adaptó del manual para la identificación de peligros, evaluación de riesgos y determinación de controles (IPERC) publicado por la SUNAFIL basada en la R.M. 050-2013-TR, teniéndose las siguientes consideraciones.

### 3.4.5 Matriz de evaluación

El método cualitativo usado se resume en una tabla que para el caso de nuestra investigación se obvió las columnas de actividad y puesto de trabajo ya que la evaluación realizada está enfocada en las concentraciones de Arsénico y Mercurio y como estas pueden generar incidentes tanto a la persona como al medio ambiente.

- En la primera columna de PELIGROS Y ASPECTOS AMBIENTALES colocar el peligro u aspecto ambiental al que le realizaremos la evaluación de riesgos que en este caso es exposición y presencia de arsénico y mercurio.
- En la columna de INCIDENTE POTENCIAL describir cuáles son las consecuencias de la exposición o presencia de estos metales pesados.
- La columna de MEDIDAS DE CONTROL hace referencia que controles se tiene implementado actualmente.

- En la columna de EVALUACIÓN DE RIESGOS está conformada por los criterios de evaluación teniendo en cuenta la probabilidad y severidad en este caso de la presencia de arsénico y mercurio que luego de una valoración aplicando la fórmula:
- $ER = P \times S$
- Siendo ER la evaluación de riesgos, P que indica la probabilidad y S la severidad de la exposición a estos metales pesados dando como resultado un valor que indica el nivel de riesgo pudiendo ser esta alta, media o baja.
- Y la última columna indicar que acciones se propone implementar para bajar los niveles de riesgo que en este caso son las concentraciones de arsénico y mercurio tanto en la fuente como en la zona de influencia directa.

### 3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### 3.5.1 Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos

Las variables para analizar corresponden a una investigación de tipo experimental y son:

- Variable Independiente: “ichu” en su variedad (*Stipa ichu*) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- Variable Dependiente: Concentración de As y Hg.

#### 3.5.2 Descripción detallada del uso de materiales, equipos, insumos, entre otros

##### A. Materiales

- Bolsas de polietileno para recolección de muestras.
- Capsulas Petri.
- Crisoles.
- Frascos para la recolección de muestras.
- Fiolas 10 ml.
- Guantes.
- Hojas.
- Lapiceros.
- Memoria USB.

- Pala.
- Pinzas.
- Pipetas calibradas.
- Probetas de diferentes medidas.
- Tijeras.
- Vasos de precipitado 500 ml.

#### **B. Equipos**

- Agitador Magnético VELP Científica.
- Balanza electrónica Mettler Toledo.
- Cocinilla Eléctrica de laboratorio marca Magefesa.
- Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES.
- Termómetro digital TP101.

#### **C. Insumos**

- Agua destilada.
- Ácido nítrico 100 % de concentración.
- Ácido perclórico 70 % de concentración.
- Solución standard de Arsénico 1000 ug/ml en 5 % de ácido nítrico.
- Solución standard de Mercurio 1000 mg/l en ácido nítrico 2 molar.

### **3.6 Aplicación de prueba estadística inferencial**

La hipótesis planteada se probó estadísticamente siguiendo los pasos que a continuación se mencionan.

#### **3.6.1 Hipótesis estadística**

- $H_0: Y \neq F$  (Distribución Normal): No es bioindicador de As y Hg en las muestras tomadas en fuente y zona de influencia.
- $H_1: Y=F$  (Distribución Normal): Es un bioindicador de As y Hg en las muestras tomadas en fuente y zona de influencia.
- Margen de error  $\alpha$ : 0,5.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 Determinación de la concentración de As y Hg en las muestras

Al realizar los análisis de las muestras de Ichu (*Stipa Ichu*) determinando la concentración de As y Hg tanto en la fuente correspondiente a la especie vegetal al borde del río que representa la concentración inicial, así como en la zona de influencia en un área de 6 metros considerada la concentración final se obtuvo los siguientes resultados explicados estadísticamente.

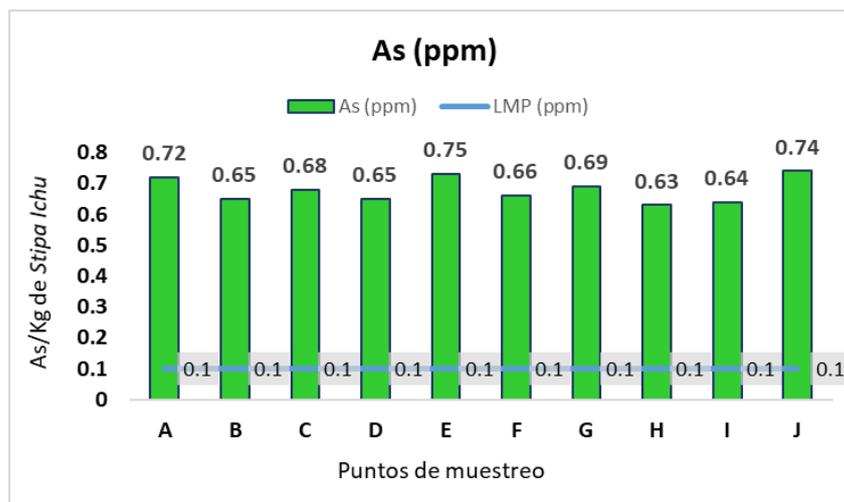
##### A. Estadística descriptiva

##### A.1 Concentración inicial de As y Hg en la fuente

Los valores del promedio de Arsénico y Mercurio encontrados en la fuente que hace referencia a la zona geográfica que está al borde del río Llallimayo justo entre la frontera entre el río y la zona de vegetación representaría la concentración inicial (Ver anexo 2).

##### Figura 7

*Concentraciones de As encontrados en la fuente*



En la Figura 7 se puede observar que la mayor concentración de As se dio en el punto E, que se tomó en las coordenadas 15°06'07''S 70°52'35''W siendo este valor de 0,75 ppm, al contrastar este dato con la

concentración de As analizada del agua cuyo valor es de 1,15 ppm para arsénico podemos determinar una variación de concentración en Arsénico:

- [Variación de concentración As] = [Concentración de As en muestra de agua] – [Concentración máxima de As en la fuente vegetal al borde del río]
- [Variación de concentración As] = 1,15 ppm – 0,75 ppm
- [Variación de concentración As] = 0,40 ppm

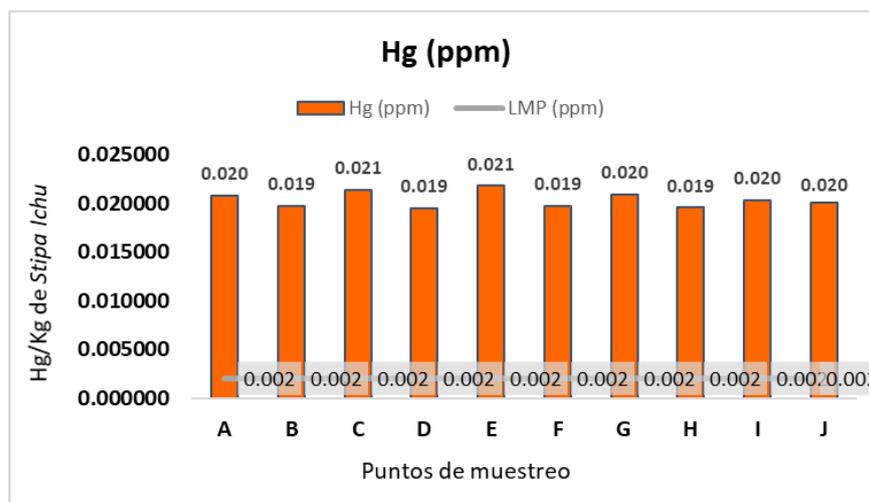
Este valor de concentración indicaría una variación de bioacumulación de As en planta de 0,40 ppm o en su factor de conversión a 0,40 (mg de As/kg de *Stipa ichu*).

Según las conclusiones halladas por Cercado y Ramos (2021) en su estudio de especies bioacumuladoras de arsénico vieron que la *Lachemilla procubens* perteneciente a la familia poaceae presentaba una bioacumulación de 7787,8 (mg/kg) esto puede ser debido a los factores de acidez del suelo, concentración inicial en la fuente y también por la taxonomía de la planta que presenta hojas un tallo cilíndrico y hueco en los entrenudos que podrían facilitar su bioabsorción, a su vez en el trabajo de investigación de Ricapa (2020) que vio el potencial de bioacumulación de la especie *Stipa ichu* en la laguna de Yamate en Cerro de Pasco, mostrando dentro de sus resultados porcentajes de bioacumulación efectiva de manganeso 117 (mg/kg) y plomo 7,92 (mg/kg) concluyendo también que la especie *Stipa ichu* se adapta a cualquier suelo contaminado.

Teniendo en cuenta estos antecedentes y los resultados obtenidos se estaría concluyendo que la especie *Stipa ichu* también debería ser considerado como un bioindicador de la presencia de arsénico.

**Figura 8**

*Concentración de Hg encontrados en la fuente*



Referente a la figura 8 que muestra la concentración inicial de mercurio en el borde del río Llallimayo, podemos apreciar un valor máximo de 0,021 ppm que se dio en el punto C y E, que se tomó en las coordenadas 15°06′07″S 70°52′35″W; teniendo en cuenta un valor inicial analizado en el agua de 0,23 ppm, podemos determinar la variación de concentración en Mercurio:

- [Variación de concentración Hg] = [Concentración inicial de Hg en muestra de agua] – [Concentración máxima de Hg en la fuente vegetal al borde del río]
- [Variación de concentración Hg] = 0,23 ppm – 0,021 ppm
- [Variación de concentración Hg] = 0,209 ppm

Este valor de concentración indicaría una variación de bioacumulación de Hg en planta de 0,209 ppm o en su factor de conversión a 0,209 (mg de Hg/kg de *Stipa ichu*).

Parihar et al. (2020) en su estudio de potencial de bioacumulación a través de un índice de acumulación de metales y potencial de translocación para siete metales pesados entre ellos el mercurio concluyó que los valores de bioabsorción fueron superiores en la especie *C. Sericea* que es una planta tipo arbusto perteneciente a la familia *Cornaceae*, esta planta se utiliza con frecuencia para protección contra la erosión y

restauración de vías en los Estados Unidos y Canadá. Su sistema de raíces ofrece excelente retención del suelo por lo que la consideraron fitoestabilizadora, asimismo Cahuana y Arcos (1993) indicaron que los tejidos vegetales de las macrófilas acumulan con facilidad metales pesados como el mercurio, encontrando en las especies *Stipa Mucronata* y *Festuca Dolichopylla* concentraciones menores a 0,4 (mg/kg) teniendo en cuenta que los límites según la legislación española es de 0,1 (mg/kg) correspondería a un efecto bioacumulador considerable. Viendo el resultado obtenido de 0,021 (mg/kg) puede concluirse que la especie *Stipa Ichu* también es un bioindicador de mercurio, pero en menor medida.

Asimismo, luego de analizar las muestras a través de un equipo de emisión atómica se determinó que las 10 muestras contenían As y Hg. Se debe señalar que en todos los casos las concentraciones de metales sobrepasan los límites máximos permisibles según los estándares nacionales (D.S. 010-2010-MINAM).

Las concentraciones de As variaron entre 0,63 ppm (0,63 (mg/L)) en la muestra H y 0,75 ppm (0,75 (mg/L)) en la muestra E, siendo el Límite Máximo Permisible = 0,100 (mg/L) como referencia en fuente de agua.

Las concentraciones de Hg variaron entre 0,019 ppm (mg/L) y 0,021 ppm (mg/L), siendo el Límite Máximo Permisible = 0,002 (mg/L) como referencia en fuente de agua.

Estos resultados permiten establecer que la presencia tanto de arsénico como mercurio son mayores al límite máximo permitidos tanto en el D.S. 010-2010-MINAM para efluentes minero – metalúrgicas como también para los Estándares de calidad ambiental para agua.

Estos resultados permiten establecer que la presencia tanto de arsénico como mercurio son mayores al límite máximo permitidos por el D.S. 010-2010-MINAM para efluentes minero – metalúrgicas como también para los Estándares de calidad ambiental para agua, a la vez que se pone en cuenta que la presencia de estos metales es significativa en la cuenca Llallimayo como también lo concluyó dando la observación de la

presencia de la mina Aruntani S.A.C. operando por esa zona (Dalens, 2018).

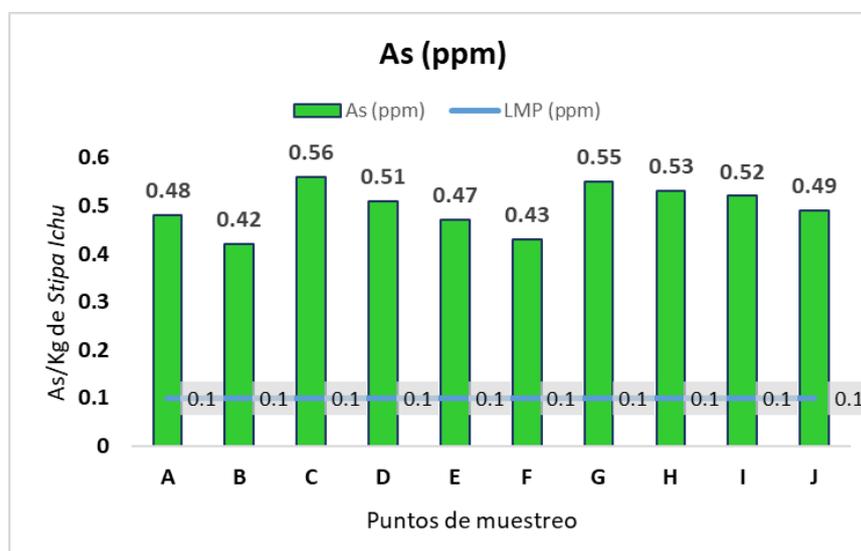
Esta capacidad de bioindicador de arsénico y mercurio también ayudará además de determinar la presencia de estos metales pesados en la flora de la zona la posible bioacumulación también en los animales que consumen esta especie vegetal y que a la larga van incrementando su concentración dentro de los tejidos hasta tenerse una presencia cuantificable como lo indico el estudio de concentración de mercurio en pelo y leche de vaca realizado por (Pacco, 2018).

## A.2 Concentración final de As y Hg en la zona de influencia

Los valores promedio de concentración final de Arsénico y Mercurio (Ver anexo 2) presentes en la zona de influencia que corresponde al área delimitada en un rango de 6 metros desde el borde del río se presentan en las siguientes figuras:

**Figura 9**

*Concentración de As encontrados en zona de influencia*



En la Figura 9 se nota que en el punto C correspondiente a las coordenadas 15°06'06''S 70°52'34''W de la zona de influencia que se encuentra en un área de 6 metros se encontró una concentración de 0,56 ppm de *Stipa ichu*, teniendo una concentración inicial en agua de 1,15 ppm se puede ver que para el As se tiene una variación de concentración de:

- [Variación de concentración As] = [Concentración de As en muestra de agua] – [Concentración final de As en la zona de influencia]
- [Variación de concentración As] = 1,15 ppm – 0,56 ppm
- [Variación de concentración As] = 0,59 ppm

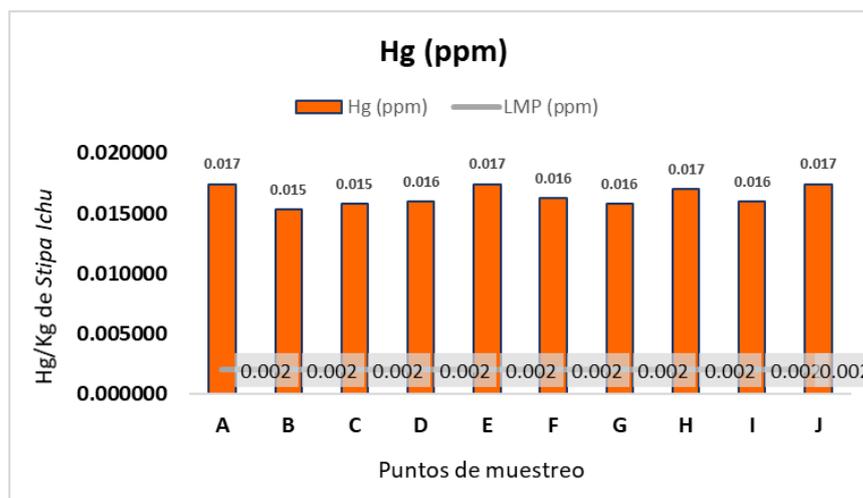
Este valor de concentración indicaría una variación de bioacumulación de As en planta de 0,59 ppm o en su factor de conversión a 0,59 (mg de As/kg de *Stipa ichu*), este valor de diferencia de concentración es mayor al encontrado en la bioacumulación de arsénico en la fuente al borde del río Llallimayo, pero aún sigue siendo considerable indicando la presencia de este metal pesado en esa zona, pero en menor concentración.

Teniendo en cuenta el estudio de Alvarez (2018) que realizó pruebas de bioacumulación en *Stipa Ichu* pero para los metales de plomo y zinc, encontró que esta especie reducía en un promedio de 12,32 (mg/kg) de estos metales indicando además que esta capacidad de bioabsorción no afectaba en nada a la planta respecto a su desarrollo. Arpasi (2018) también realizó pruebas con la especie *Bacharis sp* encontrando un valor de bioabsorción de arsénico de 48,60 (mg/kg) indicando también la influencia del pH en la capacidad de remoción de metales pesados usando esa especie vegetal, al igual que en el trabajo de investigación de Venegas (2016) que usando también la especie *Stipa Ichu* en la localidad de Huari en una zona con presencia de metales pesados tuvo como resultado positivo la bioabsorción de plomo.

Teniendo estas consideraciones se puede concluir que la especie vegetal *Stipa ichu* cumple la función de bioindicador de la presencia de arsénico tanto en la fuente al borde del río como en la zona de influencia.

**Figura 10**

*Concentración de Hg encontrados en zona de influencia*



Analizando también la Figura 10 respecto a la mayor concentración de mercurio en la zona de influencia demarcada a 6 metros de la fuente se vio una mayor concentración en el punto A, E, H y J correspondientes a las coordenadas 15°06'06''S 70°52'32''W este valor corresponde a 0,017 ppm, realizando un cálculo de la variación de concentración en la zona de influencia tenemos:

- [Variación de concentración Hg] = [Concentración inicial de Hg en muestra de agua] – [Concentración máxima de Hg en la zona de influencia]
- [Variación de concentración Hg] = 0,23 ppm – 0,017 ppm
- [Variación de concentración Hg] = 0,213 ppm

Este valor de concentración indicaría una variación de bioacumulación de Hg en planta de 0,213 ppm o en su factor de conversión a 0,213 (mg de Hg/kg de *Stipa ichu*). De acuerdo a estos resultados y teniendo en cuenta los estudios realizados por Ríos (2017) respecto a la eficiencia fitorremediadora en rye grass con un 75 %, geranio en un 69 % y la malva en un 68 % para remoción de metales pesados se puede determinar que la *Stipa Ichu* también puede ser considerado bioindicador de la presencia de mercurio, además que a diferencia de las plantas antes mencionadas que requieren de un ambiente óptimo para su desarrollo la *Stipa Ichu* se desarrolla en suelos y climas más agrestes.

De igual manera luego de analizar todas las muestras a través del equipo de emisión atómica se determinó que las 10 muestras contenían As y Hg. Se debe señalar que en todos los casos las concentraciones de metales también sobrepasan los límites máximos permisibles con referencia al agua.

Estos resultados permiten establecer que la presencia tanto de arsénico como mercurio son mayores al límite máximo permitidos por el D.S. 010-2010-MINAM para efluentes minero – metalúrgicas como también para los Estándares de calidad ambiental para agua, a la vez que se pone en cuenta que la presencia de estos metales es significativa en la cuenca llallimayo como también lo concluyó Dalensn (2018) dando la observación de la presencia de la mina Aruntani S.A.C. operando por esa zona.

Esta capacidad de bioindicador de arsénico y mercurio también ayudará además de determinar la presencia de estos metales pesados en la flora de la zona la posible bioacumulación también en los animales que consumen esta especie vegetal y que a la larga van incrementando su concentración dentro de los tejidos hasta tenerse una presencia cuantificable como lo indico el estudio de concentración de mercurio en pelo y leche de vaca realizado por Pacco (2018).

### A.3 Determinación de la variación de concentración entre las muestras

**Tabla 4**

*Variación de la Concentración de arsénico (ppm)*

Punto de Muestreo	Concentración Inicial en Fuente	Concentración Final en Zona de Influencia	Variación de Concentración
A	0,72	0,48	0,24
B	0,65	0,42	0,23
C	0,68	0,56	0,12
D	0,65	0,51	0,14
E	0,75	0,47	0,28

Punto de Muestreo	Concentración Inicial en Fuente	Concentración Final en Zona de Influencia	Variación de Concentración
F	0,66	0,43	0,23
G	0,69	0,55	0,14
H	0,63	0,53	0,10
I	0,64	0,52	0,12
J	0,74	0,49	0,25

En la tabla 4 se muestra las variaciones de concentración de arsénico de las muestras de Stipa Ichu determinadas como la diferencia entre la concentración inicial de la fuente al borde del río Llallimayo y la concentración final a 6 metros del borde del río Llallimayo denominada zona de influencia.

Las diferencias de concentraciones de As variaron entre 0,12 y 0,25 ppm en las muestras tomadas. Siendo el límite máximo permisible de 0,100 ppm (mg/L).

**Tabla 5**

*Variación de la Concentración de mercurio (ppm)*

Punto de Muestreo	Concentración Inicial en Fuente	Concentración Final en Zona de Influencia	Variación de Concentración
A	0,020	0,017	0,003
B	0,019	0,015	0,004
C	0,021	0,015	0,006
D	0,019	0,015	0,004
E	0,021	0,017	0,004
F	0,019	0,016	0,003
G	0,020	0,015	0,005
H	0,019	0,016	0,003
I	0,020	0,015	0,005
J	0,020	0,017	0,003

En la tabla 5 se muestra las variaciones de concentración de mercurio de las muestras de Stipa Ichu determinadas como la diferencia

entre la concentración inicial de la fuente al borde del río Llallimayo y la concentración final a 6 metros del borde del río Llallimayo denominada zona de influencia. Las concentraciones de Hg variaron entre 0,003 y 0,006 ppm en las muestras tomadas. Siendo el límite máximo permisible de 0,002 ppm (mg/L). según la legislación vigente (D.S.010-2010-EM). De igual manera estos resultados permiten establecer la presencia tanto de arsénico como mercurio, lo que conlleva a señalar que la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) puede utilizarse como bioindicador de As y Hg presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.

## **B. Estadística inferencial**

### **B.1 Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk del As y Hg**

Para poder validar si existe realmente una diferencia significativa entre las concentraciones de arsénico de las muestras tomadas en la fuente y zona de influencia, se realizó el test de Shapiro-Wilk, que verifica la hipótesis a través de la distribución normal de los datos.

### **B.2 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk del As**

Se obtiene la variación de la concentración de As:

**Tabla 6**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk de As*

<b>C. Inicial As (ppm)</b>	<b>C. Final As (ppm)</b>	<b>Variación As (ppm)</b>
0,72	0,48	0,24
0,65	0,42	0,23
0,68	0,56	0,12
0,65	0,51	0,14
0,75	0,47	0,28
0,66	0,43	0,23
0,69	0,55	0,14
0,63	0,53	0,10
0,64	0,52	0,12
0,74	0,49	0,25

**Tabla 7**

*Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en As*

N.º Muestra	Yi	Y <sup>2</sup>	ai	Y <sub>n-i+1</sub> - Yi	ai (Y <sub>n-i+1</sub> - Yi)
1	0,10	0,01	0,5739	0,16	0,091824
2	0,12	0,0144	0,3291	0,13	0,042783
3	0,12	0,0144	0,2141	0,12	0,025692
4	0,14	0,0196	0,1224	0,09	0,003591
5	0,14	0,0196	0,0399	0,09	0,003591
6	0,23	0,0529			
7	0,23	0,0529			
8	0,24	0,0576			
9	0,25	0,0625			
10	0,28	0,0784			
Sumatorias	1,850000	0,382300	1,279400	0,610000	0,186384

Donde los valores de “ai”, se obtienen de las tablas de prueba de Shapiro-Wilk,  $Y_{n-i+1} - Y_i$ , se obtiene de la resta del dato menor y del dato mayor y  $ai (Y_{n-i+1} - Y_i)$ , es la multiplicación de ambos valores.

Seguidamente se obtienen los siguientes datos:

$n = 10$  (cantidad de datos)

$b = 0,186384$  (la sumatoria de los valores del producto de  $ai (Y_{n-i+1} - Y_i)$ )

$Y = 0,185$  (media aritmética)

$S^2 = 0,040050$  (Varianza)

Estadístico de prueba de Shapiro-Wilk ( $W_c$ ):

$$W_c = b^2 / S^2$$

Reemplazando los datos se obtiene el siguiente resultado:

$$W_c = 0.86739065$$

Hallando el valor de Shapiro-Wilk de Tabla ( $W_t$ ):

Para una significancia  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 10$ , mediante los valores de tablas se obtiene el valor de:

$$W_t = 0,842$$

Se procede a plantear la hipótesis nula y la hipótesis alterna donde:

La variable tiene distribución normal, si  $W_c > W_t$

la variable tiene distribución no normal, si  $W_c < W_t$

Comparando los valores de  $W_c$  y  $W_t$ :

$$W_c > W_t$$

$$0,867390656 > 0,842$$

Donde:

El estadístico de prueba es mayor que el estadístico de tabla, por consiguiente, se define que se rechaza la hipótesis nula, la variable tiene una distribución normal con una significancia de 0,05.

### B.3 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk del Hg

Se obtiene la variación de la concentración de As:

**Tabla 8**

*Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk del Hg*

C. Inicial As (ppm)	C. Final As (ppm)	Variación As (ppm)
0,72	0,48	0,24
0,65	0,42	0,23
0,68	0,56	0,12
0,65	0,51	0,14
0,75	0,47	0,28
0,66	0,43	0,23
0,69	0,55	0,14
0,63	0,53	0,10
0,64	0,52	0,12

**Tabla 9**

*Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en Hg*

N.º Muestra	Y <sub>i</sub>	Y <sup>2</sup>	a <sub>i</sub>	Y <sub>n-i+1</sub> - Y <sub>i</sub>	a <sub>i</sub> (Y <sub>n-i+1</sub> - y <sub>i</sub> )
1	0,0026	0,00000676	0,5739	0,0030	0,0017217
2	0,0027	0,00000729	0,3291	0,0025	0,0008227
3	0,0034	0,00001156	0,2141	0,0011	0,0002355
4	0,0035	0,00001225	0,1224	0,0009	0,0001101
5	0,0036	0,00001296	0,0399	0,0008	0,0000319
6	0,0044	0,00001936			
7	0,0044	0,00001936			
8	0,0045	0,00002025			
9	0,0052	0,00002704			
10	0,0056	0,00003136			
Sumatorias	0,0399	0,000168	1,2794	0,0083	0,002922

El estadístico de prueba es mayor que el estadístico de tabla, por consiguiente, se define que se rechaza la hipótesis nula, la variable tiene una distribución normal con una significancia de 0,05.

Donde los valores de “a<sub>i</sub>”, se obtienen de las tablas de prueba de Shapiro-Wilk, Y<sub>n-i+1</sub> - Y<sub>i</sub>, se obtiene de la resta del dato menor y del dato mayor y a<sub>i</sub> (Y<sub>n-i+1</sub> - Y<sub>i</sub>), es la multiplicación de ambos valores.

Seguidamente se obtienen los siguientes datos:

n = 10 (cantidad de datos)

b = 0,0029 (la sumatoria de los valores del producto de y a<sub>i</sub> (Y<sub>n-i+1</sub> - Y<sub>i</sub>))

Y = 0,003990 (media aritmética)

S<sup>2</sup> = 0,000009 (Varianza)

Estadístico de prueba de Shapiro-Wilk (W<sub>c</sub>):

$$W_c = b^2 / S^2$$

Reemplazando los datos se obtiene el siguiente resultado:

$$W_c = 0,949862917$$

Hallando el valor de Shapiro-Wilk de Tabla ( $W_t$ ):

Para una significancia  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 10$  mediante los valores de tablas se obtiene el valor de:

$$W_t = 0,842$$

Se procede a plantear la hipótesis nula y la hipótesis alternativa donde:

La variable tiene distribución normal, si  $W_c > W_t$

La variable tiene distribución no normal, si  $W_c < W_t$

Comparando los valores de  $W_c$  y  $W_t$ :

$$W_c > W_t$$

$$0,950 > 0,842$$

Donde:

El estadístico de prueba es mayor que el estadístico de tabla, por consiguiente, se define que se rechaza la hipótesis nula, la variable tiene una distribución normal con una significancia de 0.05.

#### **4.2.1 Identificación de peligros y análisis de riesgos por presencia de As y Hg**

Teniendo en cuenta que las concentraciones de As y Hg encontradas en las muestras superan los límites máximos permisibles por la legislación nacional se procedió a realizar una matriz de identificación de peligros, evaluación de riesgos y propuesta de controles dividiendo tanto la parte de seguridad como la parte ambiental para de esta manera proponer controles que ayuden a mitigar los efectos que puedan causar en materia de salud a la población de la zona de influencia.

Los criterios tomados en cuenta para la elaboración de la matriz de identificación de peligros y análisis de riesgos se resumen a continuación.

**Tabla 10**

*Probabilidad de que ocurra el(los) evento(s) asociado(s)*

Clasificación	Probabilidad De Ocurrencia	Puntaje
Baja	La presencia del metal pesado se ha presentado una vez o nunca en las muestras del área de influencia.	3
Media	La presencia del metal pesado se ha presentado 2 a 4 veces en las muestras del área de influencia.	5
Alta	La presencia del metal pesado se ha presentado 4 a 8 veces en las muestras del área de influencia.	9

El factor de probabilidad se muestra en la tabla 10; para determinar la probabilidad de daño, se debe considerar el grado de deficiencia encontrado, y si las medidas de control son suficientes con base en la escala sugerida, la evaluación se centrará en la presencia de los metales pesados investigados. Para nuestro caso los puntajes asignados serán entre 3 a 9 determinados por la presencia de los metales pesados en los 8 puntos tomados como referencia lo cual se denominará como probabilidad de ocurrencia que es directamente la presencia de arsénico y mercurio en esos puntos de muestreo.

**Tabla 11**

*Criterios de severidad*

Clasificación	Severidad o Gravedad	Puntaje
Ligeramente dañino	La exposición al metal pesado no requiere de tratamiento médico / tratamiento ambiental	4

Clasificación	Severidad o Gravedad	Puntaje
Dañino	La exposición al metal pesado requiere tratamiento médico, intoxicación. / tratamiento ambiental	6
Extremadamente dañino	La exposición al metal pesado puede provocar Fatalidad – Para / Cuadriplejia – Ceguera. Incapacidad permanente/contaminación ambiental	8

La tabla 11 corresponde a los criterios de severidad también denominado nivel de las consecuencias previsibles, en este punto debe considerarse la naturaleza del daño, para nuestro caso se determinó mediante la consecuencia que puede traer la exposición del metal pesado respecto a su toxicidad y contaminación ambiental que puede generar.

**Tabla 12**

*Evaluación y clasificación del riesgo*

Severidad Probabilidad	Mínimamente dañino (4)	Dañino (6)	Extremadamente dañino (8)
Baja (3)	12 a 20 Riesgo Bajo	12 a 20 Riesgo Bajo	24 a 36 Riesgo Moderado
Media (5)	12 a 20 Riesgo Bajo	24 a 36 Riesgo Moderado	40 a 54 Riesgo Importante
Alta (9)	24 a 36 Riesgo Moderado	40 a 54 Riesgo Importante	60 a 72 Riesgo Crítico

En la tabla 12 se incluye la clasificación del riesgo tanto de la parte de seguridad como la parte ambiental, para ello relacionamos las tablas 7 y 8 de tal manera que nos dé un valor dentro del rango establecido en la tabla de clasificación de riesgos.

En términos generales, para identificar los peligros, en primer lugar, hay que crear una lista de todos los puestos de la organización mediante una Descripción y Análisis de Puestos. En segundo lugar, hay que describir los procedimientos de producción utilizados por la empresa.

Respecto al desarrollo de los puntos antes mencionados para nuestro caso no aplicarían puesto que no se está evaluando directamente el riesgo en un puesto de trabajo, sino que se evalúa el riesgo de la presencia de arsénico y mercurio en la especie *Stipa Ichu* y como esto mediante la cadena trófica puede llegar a afectar tanto a las personas como al medio ambiente.

A continuación, se enumeran las acciones preventivas y protectoras pertinentes por orden de prioridad:

- La eliminación de los peligros y riesgos.
- La utilización de medios administrativos o técnicos para tratar, controlar o aislar los riesgos y peligros.
- La disminución de los riesgos y peligros mediante el uso de prácticas de trabajo seguras, como las medidas de control administrativo.
- Disponer la sustitución gradual de prácticas, métodos, herramientas, materiales y bienes de riesgo tan pronto como sea factible.
- Ofrecer equipos de protección individual adecuados como último recurso.

Para el caso de evaluación de riesgos tanto de seguridad como ambiental por la presencia de metales pesados se propuso controles netamente de ingeniería determinadas como un plan de acción. De acuerdo a todas estas consideraciones se plasman los resultados obtenidos en la tabla 10 considerando la parte de seguridad y la ambiental de manera diferenciada resultando los riesgos entre riesgo importante y crítico que sugiere una intervención prioritaria para implementar los planes de acción.

**Tabla 13**

*Matriz de evaluación y clasificación del riesgo*

Peligros	Incidente potencial	Medida de control	Evaluación de riesgos			Plan de acción
			Probabilidad (P)	Severidad (S)	Evaluación del riesgo	
Exposición de personas y animales a Arsénico en fuente de agua	Intoxicación por Arsénico Desarrollo de cáncer	Consumo de agua mineral y aguas de pozo para cocción de alimentos Tratamiento de aguas mediante floculación y adición de cloro Pastoreo de animales fuera de las zonas de influencia	9	8	72	<p>Adsorción a base de hidróxido de hierro granulado</p> <p>Floculación/Filtración mediante sales de Hierro o Aluminio</p> <p>Eliminación de Arsénico por mediante membranas de nanofiltración u osmosis inversa</p> <p>Tratamiento mediante fotocatálisis heterogénea con dióxido de Titanio</p> <p>Tratamiento Biológico usando microorganismos Enterobacter Cloaceae (bacteria marina)</p> <p>Adsorción mediante Slices mesoporosa, calcogenuros y carbonos mesoporosos</p>
			Critico	Si	Alto	
Exposición de personas y animales a Mercurio en fuente de agua	Intoxicación por Mercurio Desarrollo de cáncer	Consumo de agua mineral y aguas de pozo para cocción de alimentos Tratamiento de aguas mediante floculación y adición de cloro Pastoreo de animales fuera de las zonas de influencia	9	8	72	<p>Adsorción a base de hidróxido de hierro granulado</p> <p>Floculación/Filtración mediante sales de Hierro o Aluminio</p> <p>Eliminación de Arsénico por mediante membranas de nanofiltración u osmosis inversa</p> <p>Tratamiento mediante fotocatálisis heterogénea con dióxido de Titanio</p> <p>Tratamiento Biológico usando microorganismos Enterobacter Cloaceae (bacteria marina)</p> <p>Adsorción mediante Slices mesoporosa, calcogenuros y carbonos mesoporosos</p>
			Critico	Si	Alto	

**Tabla 14**

*Matriz de evaluación y clasificación del riesgo ambiental*

Aspecto ambiental	Incidente potencial	Medida de control	Evaluación de riesgos ambientales			Plan de acción	
			Probabilidad (P)	Medio ambiente	Higiene ocupacional		
			Severidad (S)	Evaluación del riesgo	Existe evaluación de riesgo	Nivel de riesgo	
Presencia de Arsénico en <i>Stipa Ichu</i>	Bioacumulación de Arsénico	Ninguna	6	54	No	Alto	Monitoreo ambiental de la zona de influencia y Fitorremediación
Presencia de Mercurio en <i>Stipa Ichu</i>	Bioacumulación de Mercurio	Ninguna	6	54	No	Alto	Monitoreo ambiental de la zona de influencia y Fitorremediación
Presencia de efluentes con Arsénico	Contaminación del agua Contaminación del suelo	Monitoreo Ambiental Reuniones multisectoriales para generación de plan de acción de recuperación de la cuenca llallimayo	8	72	Si	Alto	Construcción de una planta de tratamiento de aguas para consumo humano
Presencia de efluentes con Mercurio	Contaminación del agua Contaminación del suelo	Monitoreo Ambiental Reuniones multisectoriales para generación de plan de acción de recuperación de la cuenca llallimayo	8	72	Si	Alto	Construcción de una planta de tratamiento de aguas para consumo humano

## 4.2 Discusión

En la investigación se logró demostrar que la planta *Stipa ichu*, es un bioindicador de la presencia tanto de arsénico como mercurio en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo al verificarse las variaciones de concentración que para el caso del arsénico se encontraba entre los valores de 0,12 y 0,25 ppm que están por encima de 0,10 ppm establecido como límite máximo permisible para agua de efluentes minero metalúrgicos, de igual manera para el mercurio se tiene valores entre 0,003 y 0,006 ppm que están por encima de 0,002 ppm situación que presenta una ventaja del uso de la planta como potencial bioindicador de suelos contaminados con dichos metales, situación que ha sido investigada en los últimos años, por autores como Parihar et al. (2020), Arpasi (2019), Panduro y Soria (2015) y otros, donde en sus estudios han planteado el uso de diversas especies vegetales como agentes efectivos en la lucha contra la contaminación de metales pesados en suelos.

En cuanto a otro de los resultados obtenidos en el estudio señalan la presencia del arsénico y mercurio como contaminantes dentro del contexto del río evaluado, señalando que las concentraciones de los metales estudiados son mayores al límite permisible de acuerdo a la legislación nacional. Situación que concuerda con otros autores como Barba et al. (2017), Graza y Quispe (2015) que en sus estudios se plantearon determinar las concentraciones de metales pesados, específicamente, Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Manganeso, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc; en ríos para hacer una comparación con los límites máximos permisibles establecidos, por la legislación nacional vigente.

## CONCLUSIONES

- Los resultados permiten establecer la presencia tanto de arsénico como mercurio en la especie vegetal Ichu (*Stipa ichu*), como lo demuestran las concentraciones de As variaron entre 1,15 ppm (1,15 mg/L) en las muestras tomadas del agua y se tuvo una variación de concentración de este metal entre 0,12 y 0,25 ppm (mg/L) en las muestras de *Stipa ichu*, y la concentración de Hg se encontró en 0,23 ppm (mg/L) en la muestra del agua y una diferencia de concentración entre 0,003 y 0,006 ppm (mg/L) en la muestra de la especie vegetal, lo que conlleva a señalar que la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) puede utilizarse como bioindicador del As y Hg presente en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.
- En relación al primer y segundo objetivo específico, se tiene que si existe una concentración de As y Hg respecto a la variedad de “ichu” (*Stipa ichu*) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo respecto a que se encontró valores por encima al límite máximo permisible por la legislación vigente.
- En cuanto al tercer objetivo específico, luego de analizados los resultados se concluye que existe una diferencia significativa en las concentraciones encontrados de Arsénico y Mercurio en las muestras tomadas en fuente vegetal al borde del río Llallimayo y zona de influencia, dado por una significancia menor a 0,05 y validada mediante un análisis estadístico indicando que la especie vegetal *Stipa ichu* tiene un fuerte potencial bioindicador de arsénico y mercurio en las condiciones del presente estudio.
- Por último, en base a la evaluación de riesgos realizada mediante la matriz de aspecto ambiental y matriz de identificación de peligros y evaluación de riesgos dieron como resultado la presencia de un riesgo crítico en todas las muestras tomadas tanto de agua como de la especie vegetal *Stipa Ichu* que indica la presencia de Arsénico y Mercurio que están fuera de los límites máximos permisibles por la legislación vigente, lo que conlleva a señalar la existencia de un riesgo muy alto, que establece que se debe realizar la aplicación de los controles de ingeniería propuestos para disminuir las concentraciones tanto de arsénico como mercurio, señalando esto como una necesidad inmediata.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la investigación en más zonas de exposición a lo largo de la cuenca del río Llallimayo con mayor cantidad de muestras y con otras plantas presentes en las zonas de influencia que además son alimento directo de los animales de la zona.
- Debido a que los niveles de Arsénico y Mercurio están por encima de los LMP en la muestra de agua, se recomienda no utilizar estos efluentes para el riego ni consumo humano.
- La especie vegetal *Stipa ichu*, aunque es capaz de acumular metales pesados, no se aconseja su uso como fuente de alimentación para el ganado, ya que podría tener importantes repercusiones toxicológicas tanto para los animales como para los seres humanos, que son los principales consumidores de metales pesados.
- Debido a que la *Stipa ichu* es una planta invasora y de disponibilidad elevada, se logró establecer un posible uso para esta como una alternativa de fitorremediación, ya que es capaz de acumular metales pesados, peligrosos contaminantes de los ambientes acuáticos.
- Para estudios posteriores que se evalúe la capacidad de la *Stipa ichu* para absorber otro tipo de contaminantes y finalmente lograr tener un amplio espectro de uso para esta planta. También, es importante que se lleve a cabo este estudio bajo condiciones ambientales que se puedan controlar para determinar finalmente si algunos parámetros como: temperatura, humedad, luz, entre otros, pueden afectar directamente a la capacidad de bioindicador y acumulación de metales pesados.
- Es sumamente importante iniciar con el tratamiento de las aguas provenientes del río Llallimayo para poder utilizarlas sin peligro en el consumo humano.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aksoy, A., & Demirezen, D. (2006). Fraxinus excelsior as a Biomonitor of Heavy Metal Pollution. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(1) <https://www.pjoes.com/-Fraxinus-excelsior-as-a-Biomonitor-of-Heavy-Metal-Pollution,87840,0,2.html>
- Alvarez, B. (2018). *Absorción de Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en suelos contaminados a través del Stipa ichu en condiciones normales y mejoradas en el distrito de Huachocolpa - Huancavelica 2018* [Tesis de Maestría, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/60176>
- Ankley, G., Bennett, R., Erickson, R., Hoff, D., Hornung, M., Johnson, R., Mount, D., Nichols, J., Russom, C., & Schmieder, P. (2010). Adverse outcome pathways: a conceptual framework to support ecotoxicology research and risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 29(3), 730-741 <https://doi.org/10.1002/etc.34>
- Anze, R., Franken, M., Zaballa, M., Pinto, M. R., Zeballos, G., Cuadros, M. A., Canseco, A., De la Rocha, A., Estellano, V. H., & Del Granado, S. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación ambiental en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA. Unidad de Calidad Ambiental. Instituto de Ecología*, 74 <https://cebem.org/revistaredesma/vol11/contenido.htm>
- Arce, S. (2017). *Suelos contaminados con plomo en la ciudad de La Oroya - Junín y su impacto en la calidad del agua del río Mantaro* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/6718>
- Arpasi, D. (2019). *Determinación de metales pesados en la especie baccharis sp que crece en el ámbito del proyecto minero "estela"–Ananea–provincia de San Antonio de Putina–Puno* [Tesis de Maestría, Universidad Privada San Carlos]. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/4552>
- Astete, J., Cáceres, W., Gastañaga, M., Lucero, M., Sabastizagal, I., Oblitas, T., Pari, J., & Rodríguez, F. (2009). Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1), 15–19.



[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-46342009000100004](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342009000100004)

- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. Biblioteca Nacional Del Perú N° 2016-03541, Art. Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0>
- Ayodeji, F., & Olorunsola, O. (2011). Siam weed along highways, herbal medicine or poison *Toxicological & Environmental Chemistry*, 93(3), 487-493 <https://doi.org/10.1080/02772248.2010.540243>
- Baker, A. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of plant nutrition*, 3(1-4), 643-654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>
- Barba, A., Olivera, E., Milla, M., Narváez, E., Giraldo, W., Narváez, J., & Mena, E. (2017). Evaluación de las concentraciones de metales pesados en los ríos Auqui y Paria en la región Ancash, Perú [Universidad Le Cordon Bleu]. <https://repositorio.ulcb.edu.pe/handle/ULCB/195>
- Becerril, J., Barrutia, O., García, J., Hernández, A., Olano, J., & Garbisu, C. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*, 16(2). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/128>
- Bothe, H. (2011). Plants in heavy metal soils. En *Detoxification of heavy metals* (pp. 35-57). Springer [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21408-0\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21408-0_2)
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). The soils around us. *The Nature and Properties of Soils, 14th ed Pearson Prentice Hall, New Jersey and Ohio*, 1-31 [https://www.researchgate.net/publication/233861652\\_The\\_Soils\\_Around\\_Us](https://www.researchgate.net/publication/233861652_The_Soils_Around_Us)
- Brooks, R., Lee, J., Reeves, R., & Jaffré, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 7, 49-57 [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(77\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0375-6742(77)90074-7)

- Cahuana, R., & Arcos, J. (1993). *Variedades de Papa más importantes en Puno y lineamientos para su caracterización* [Tesis de Grado, Universidad Nacional San Agustín] <https://hdl.handle.net/11537/27616>
- Canales, J. (2021). *Revisión sistemática de diferentes métodos de fitorremediación en suelos contaminados con metales pesados*. [Tesis de Licenciatura, Universidad César Vallejo] <https://hdl.handle.net/20.500.12692/61315>
- Castro, M. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *International Congress: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America. Ciudad de México* DOI:10.1590/S1516-93322003000400003
- Cercado, C., & Ramos, F. (2021). *Estudio de las Especies Vegetales Bioacumuladoras de Arsenico, Cadmio y Plomo Emergentes en Areas Mineras Altoandinas Del Perú* [Tesis de Licenciatura, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/27615>
- Chaney, R., Li, Y., Brown, S., Homer, F., Malik, M., Angle, S., Baker, A., Reeves, R., & Chin, M. (2020). Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems: approaches and progress. En *Phytoremediation of contaminated soil and water* (pp. 129-158). CRC press. DOI:10.1201/9780367803148-7
- Cossios, D. (2018). *Informe sobre estado y tendencias de la diversidad de especies, genética y cultural en el Perú* doi: <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v30i4.26245>
- Covarrubias, S., Peña, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7-21 DOI:10.20937/RICA.2017.33.esp01.01
- Dalens, J. (2018). *Evaluación de la calidad del agua de la cuenca Llallimayo de la Provincia de Melgar, Región Puno* [Tesis de Mestría, Universidad José Carlos Mariátegui]. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/640>
- Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B. P., Rai, J. P., Sharma, P. K., & Lade, H. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of

- fundamental processes. *Sustainability*, 7(2), 2189-2212.  
<https://doi.org/10.3390/su7022189>
- Duffus, J. (2003). « Heavy metals»-A meaningless term?(IUPAC Technical Report).  
*Pure and Applied Chemistry*, 75(9), 1357.  
<https://doi.org/10.1351/pac200375091357>
- Ferré, N., Schuhmacher, M., Llobet J., & Domingo, J. (2007). Metales pesados y salud.  
*Mapfre Seguridad*, 108(4), 50-58.  
<https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/2508799>
- Gaur, N., Flora, G., Yadav, M., & Tiwari, A. (2014). A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 16(2), 180-193. DOI: 10.1039/c3em00491k
- Ginocchio, R., & Baker, A. (2004). Metallophytes in Latin America: a remarkable biological and genetic resource scarcely known and studied in the region. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 185-194 DOI:10.4067/S0716-078X2004000100014
- Ginocchio, R., & Baker, A. (2004). Metallophytes in Latin America: a remarkable biological and genetic resource scarcely known and studied in the region. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 185-194. DOI:10.4067/S0716-078X2004000100014
- González, I., Muena, V., Cisternas, M., & Neaman, A. (2008). Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista chilena de historia natural*, 81(2), 279-291  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=369944286010>
- Greenwood, N., & Earnshaw, A. (2012). Chemistry of the Elements. Elsevier.  
<https://www.sciencedirect.com/book/9780750633659/chemistry-of-the-elements>
- Gremion, F., Chatzinotas, A., Kaufmann, K., Von Sigler, W., & Harms, H. (2007). Impacts of heavy metal contamination and phytoremediation on a microbial community during a twelve-month microcosm experiment. *FEMS Microbiology Ecology*, 48(2), 273-283. DOI: 10.1016/j.femsec.2004.02.004

- Hall, A. (2002). Chronic arsenic poisoning. *Toxicology letters*, 128(1-3), 69-72 DOI: 10.1016/s0378-4274(01)00534-3
- Hoyos, M. (2014). *Bioacumulación de plomo y cadmio en Brassica oleracea subsp. capitata (L.) Metzg. y Raphanus sativus L.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/4344>
- Iannacone, J., & Dale, W. (1999). Protocolo de bioensayo ecotoxicológico para evaluar metales pesados contaminantes de agua dulce con *Chironomus calligraphus* (Diptera: Chironomidae) y *Moina macrocopa* (Crustacea: Cladocera), en el Río Rímac, Lima, Perú. *Revista Peruana de Entomología*, 41(1), 111-120. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S172622162003000100016](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S172622162003000100016)
- Johnston, A. (2005). Trace elements in soil: status and management. *Essential trace elements for plants, animals and humans*, 7. DOI: 10.13140/RG.2.2.26667.26407
- Kabata, A., & Szteke, B., (2015). *Trace elements in abiotic and biotic environments.* Taylor & Francis <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/41690>
- Khanna, P. (2011). Assessment of heavy metal contamination in different vegetables grown in and around urban areas. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 5(3), 162. DOI:10.3923/rjet.2011.162.179
- Kidd, P., Castro, C., Lestón, M., & Monterroso, C. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum L.* *Ecosistemas*, 16(2). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/126>
- Labys, W., Lesourd, J., & Badillo, D. (1998). The existence of metal price cycles. *Resources policy*, 24(3), 147-155. [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301-4207\(98\)00023-3](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301-4207(98)00023-3)
- Lara, B. (2018). *Evaluación de la Cannabis Sativa Industrializada L (cáñamo industrial), en la restauración de suelos contaminados con metales pesados.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica Federico]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/46174>

- Matta, G., Gjyli, L. (2016). Mercurio, plomo y arsénico: impacto en el medio ambiente y la salud humana. *Revista de ciencias químicas y farmacéuticas*.  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2299951>
- Meagher, R. (2000). Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current opinion in plant biology*, 3(2), 153-162 [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(99\)00054-0](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(99)00054-0)
- Meharg, A., & Zhao, F. (2012). *Arsénico y arroz*. Springer.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-2947-6>
- Meravi, N., & Prajapati, S. (2013). Effects of heavy metals/metalloids contamination of soils on micronucleus induction in *Tradescantia pallida*. *Environmental Skeptics and Critics*, 2(2), 58 DOI: 10.1016/s1383-5718(02)00004-9
- Ministerio del Ambiente. (2010). Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas. *El Peruano*, Art. DS N° 010-2010-MINAM. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-010-2010-minam/>
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., & Gamarra, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-  
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>
- O'Neill, P. (2017). *Environmental chemistry*. Routledge Vol. 3  
<https://www.routledge.com/Environmental-Chemistry/ONeill/p/book/9780751404838>.
- OMS. (1993). *Boletín informativo: Límites máximos permisible (LMP) de metales pesados en aguas de consumo humano*.  
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/limites-maximos-permisibles>
- Olivares, S., García, D., Lima, L., Saborit, I., Llizo, A., & Pérez, P. (2013). Niveles de Cadmio, Plomo, Cobre y Zinc en Hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la ciudad de la Habana, Cuba. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 285-294.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018849992013000400006](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992013000400006)

- Ortiz, R., & Aranibar, M. (2016). Plantas acumuladoras de metales en relaves mineros del altiplano de la región Puno. *Revista Científica Investigación Andina*, 15(2), 96-107. <https://revistas.uancv.edu.pe/index.php/RCIA/article/view/36/24>
- Pacco, D. (2018). *Determinación de metales pesados en leche y pelo de vacas de la cuenca del río Llallimayo Melgar – Puno* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9269>
- Padmavathiamma, P., & Li, L. (2007). Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1), 105-126. DOI:10.1007/s11270-007-9401-5
- Panduro, J y Soria, B. (2015). *Metales pesados en hojas de Myrciaria dubia (kunth) mc. vaugh. “Camu camu” y Cajanus cajan (l) huth. “puspo poroto”, que se expenden en el centro herbolario “Pasaje paquito” de la ciudad de Iquitos.* <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4720>
- Parihar, J., Parihar, P., Pakade., & Katnoria J., (2020). Potencial de bioacumulación de plantas autóctonas para la fitorremediación de metales pesados en áreas rurales de Shaheed Bhagat Singh Nagar, Punjab (India). *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 242. DOI:10.1007/s11356-020-10454-3
- Pérez, J., García, G. & Esparza, F. (2002). Papel ecológico de la flora rizosférica en fitorremediación. *Av Perspect*, 21, 297-300 <https://www.scienceopen.com/document?vid=95f3fdc7-99c3-428f-935c4b1b7fa45c51>
- Poschenrieder, C., & Barceló, J. (2003). Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to science*, 333-344. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1121670>
- Quispe, N. (2019). *Evaluación del riesgo de toxicidad a través de contaminantes en cultivos agrícolas de tallo corto en la cuenca media Quilca-Vítor-Chili, Los Tunales Tiabaya.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín] <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10804>
- Ricapa, J. (2020). *Análisis de absorción de metales en la planta Stypa Ichu en las zonas*

- no disturbado y disturbado del suelo de la Laguna Yanamate-Pasco* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2331>
- Ríos, A. (2017). *Comparación de las eficiencias fitorremediadoras de las especies Lolium Perenne, Pelargonium Hortorum y Fuertesimalva Echinata en la reducción de la concentración de plomo en suelos agrícolas del distrito de Huamantanga* [Tesis de Maestría, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3591>
- Rodrigo, D. (2018). Capacidad fitorremediadora de la especie *Helianthus annuus* mediante la incorporación de enmiendas a suelos contaminados por metales pesados (plomo, cromo) de industrias metalmeccánicas [Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1297>
- Sarma, H., Deka, S., Deka, H., & Saikia, R. (2012). Accumulation of heavy metals in selected medicinal plants. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 63-86. DIO: 10.1007/978-1-4614-0668-6\_4
- Singh, N., & Ma, L. (2006). Arsenic speciation, and arsenic and phosphate distribution in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and non-hyperaccumulator *Pteris ensiformis* L. *Environmental Pollution*, 141(2), 238-246. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.08.050
- Suaña, M. (2017). Capacidad del girasol (*Helianthus annuus* L.) para absorber cadmio de suelos contaminados en ambiente controlado-Puno. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano] <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/6779>
- SUNAFIL. (2022, December 13). Manual para la identificación de peligros, evaluación de riesgos y determinación de controles (IPERC). Gobierno Del Perú, 1–64. <https://www.gob.pe/institucion/sunafil/informes-publicaciones/3727397-manual-para-identificacion-de-peligros-y-evaluacion-de-riesgos-y-determinacion-de-controles>
- Venegas, C. (2016). *Capacidad Extracción de la Especie Stipiuichu en los Pasivos Ambientales Mineros En La Planta Concentradora De Huari – La Oroya De La*



UNCP [Tesis de Licenciatura, Universidad Alas Peruanas].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12990/5783>

Villarando, D., Villarando, P., & Villalobos, J. (2011). Fichas botánicas de especies agroforestales nativas aptas para tierras Altoandinas. *Proyecto de adaptación al impacto del retroceso acelerado de los glaciares en los Andes tropicales. Bolivia*.  
<https://www.doccity.com/es/fichas-botanicas-de-especies-agroforestales-nativas-aptas-para-tierras-altoandinas/8783112/>

Yarto, M., Santos, E., Gavilán, A., Castro, J., Gavilán, I., Rosiles, R., & Suárez, S. (2004). *Comparative Analysis for Polluted Agricultural Soils with Arsenic, Lead, and Mercury in Mexico*.  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2588816>

Zapata, J. (2019). *Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura* [Tesis de Maestría, Universidad de Piura].  
<https://hdl.handle.net/11042/4052>

ANEXOS

Anexos 1. Matriz de consistencia

Problema General	Objetivos	Hipótesis.	Variables e Indicadores	Población.
<p><b>Principal</b></p> <p>¿Cuál es la capacidad del “ichu” (Stipa Ichu) como bioindicador de As y Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo</p> <p><b>Problemas Secundarios</b></p> <p>a. ¿Qué cantidad de As es absorbida por la variedad Stipa Ichu en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo?</p> <p>b. ¿Qué cantidad de Hg es absorbida por la variedad Stipa Ichu en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo?</p> <p>c. ¿Qué riesgos se presenta en la zona por la presencia de As y Hg?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Evaluar la variedad de “ichu” (Stipa Ichu) como bioindicador de As y Hg presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>a. Identificar la capacidad de bioindicador de As respecto a la variedad de “ichu” (Stipa Ichu) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p>b. Identificar la capacidad de bioindicador de Hg respecto a la variedad de “ichu”</p>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>La variedad de “ichu” (Stipa Ichu) es un bioindicador de As y Hg presente en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p><b>Hipótesis Específicas:</b></p> <p>H1: La variedad de “ichu” (Stipa Ichu) es un bioindicador de As en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p>H0: La variedad de “ichu” (Stipa Ichu) no es un bioindicador de As en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p>H2: La variedad de “ichu” (Stipa Ichu) es un bioindicador de Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <p>Variedad de “ichu” (Stipa Ichu) presente en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Bioindicador de As y Hg.</p> <p><b>Hipótesis estadística</b></p> <p>Los datos que se obtendrán mediante los análisis serán sistematizados para determinar su grado de correlación mediante test Shapiro-Wilk para posterior a ello validar las hipótesis.</p> <p>H: Y=F (Distribución Normal); Es un bioindicador de As y Hg en las muestras tomadas</p>	<p>La población de estudio está constituida por la variedad de “ichu” (Stipa Ichu) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p><b>Muestra</b></p> <p>La muestra de estudio está constituida por las agrupaciones presentes de “ichu” (Stipa Ichu) de las cuales se consideró el promedio de 10 muestras de la orilla del río considerándose la concentración inicial (Fuente) y el promedio de 10 muestras alrededor de la zona en un área de 6 metros a la orilla del cuerpo de agua representando la concentración final (Zona de influencia directa), en el periodo de tiempo de investigación comprendido entre marzo y noviembre del 2021</p> <p><b>Diseño de muestreo</b></p> <p><b>Fase de campo</b></p>

	<p>(Stipa Ichu) presentes en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p>c. Realizar una evaluación de riesgos por la presencia de As y Hg en las aguas y zona de influencia de los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p>	<p>relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p>H0: La variedad de "ichu" (Stipa Ichu) no es un bioindicador de Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo.</p> <p>H3: En la evaluación de riesgos por la presencia de As y Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo presenta una valoración como RIESGO ALTO.</p> <p>H0: En la evaluación de riesgos por la presencia de As y Hg en los relaves mineros de la cuenca del río Llallimayo no presenta una valoración como RIESGO ALTO.</p>	<p>en fuente y zona de influencia.</p> <p>H0: <math>Y \neq F</math> (Distribución Normal); No es bioindicador de As y Hg en las muestras tomadas en fuente y zona de influencia.</p> <p>Margen de error <math>\alpha: 0.05</math></p>	<p>Se recolectará muestras no probabilísticas a diferentes distancias desde el borde del río en la cuenca Llallimayo influenciada con los relaves mineros</p> <p><b>Fase de laboratorio</b></p> <p>Las muestras de los suelos y las especies vegetales serán remitidas a los Laboratorios de la Universidad Nacional del Altiplano (UNAP), para su respectivo análisis de metales pesados; asimismo se realizará contraste mediante emisión atómica, enviando una muestra de cada especie vegetal recolectada.</p> <p><b>Análisis estadístico</b></p> <p>Los datos que se obtendrán mediante las evaluaciones, y las observaciones serán sistematizados mediante test Shapiro-Wilk; Para el análisis de los resultados se utilizará la estadística descriptiva y la estadística inferencial.</p>
--	--	--	---	--

## Anexos 2. Promedio de valores de concentración en los puntos de muestreo

1. Promedio de valores de concentración (ppm) de arsénico al borde del río Llallimayo.

PUNTO DE MUESTREO	M1	M2	M3	PROMEDIO
A	0.69	0.76	0.72	0.72
B	0.61	0.66	0.69	0.65
C	0.7	0.65	0.71	0.68
D	0.62	0.68	0.66	0.65
E	0.75	0.7	0.74	0.73
F	0.68	0.65	0.64	0.66
G	0.71	0.68	0.69	0.69
H	0.65	0.62	0.63	0.63
I	0.64	0.66	0.63	0.64
J	0.75	0.74	0.74	0.74

2. Promedio de valores de concentración (ppm) de arsénico en la zona de influencia.

PUNTO DE MUESTREO	M1	M2	M3	PROMEDIO
A	0.47	0.48	0.48	0.48
B	0.43	0.4	0.42	0.42
C	0.55	0.56	0.56	0.56
D	0.53	0.5	0.52	0.51
E	0.46	0.49	0.45	0.47
F	0.44	0.45	0.41	0.43
G	0.53	0.58	0.54	0.55
H	0.56	0.52	0.53	0.53
I	0.51	0.54	0.53	0.52
J	0.48	0.51	0.47	0.49

3. Promedio de valores de concentración (ppm) de mercurio al borde del río Llallimayo.

PUNTO DE MUESTREO	M1	M2	M3	PROMEDIO
A	0.021	0.024	0.02	0.02
B	0.019	0.02	0.019	0.019
C	0.021	0.021	0.02	0.021
D	0.019	0.02	0.019	0.019
E	0.022	0.02	0.02	0.021
F	0.019	0.018	0.019	0.019
G	0.021	0.02	0.02	0.02
H	0.019	0.021	0.019	0.019
I	0.02	0.021	0.02	0.02
J	0.021	0.02	0.019	0.02

4. Promedio de valores de concentración (ppm) de mercurio en la zona de influencia.

PUNTO DE MUESTREO	M1	M2	M3	PROMEDIO
A	0.017	0.014	0.016	0.017
B	0.015	0.017	0.014	0.015
C	0.013	0.016	0.016	0.015
D	0.017	0.014	0.015	0.015
E	0.015	0.019	0.016	0.017
F	0.014	0.018	0.015	0.016
G	0.017	0.013	0.015	0.015
H	0.014	0.017	0.016	0.016
I	0.012	0.016	0.017	0.015
J	0.021	0.015	0.017	0.017

### Anexos 3. Informe de ensayos



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN  
AMBIENTAL  
Central telefónica UNAP (051 598430)  
Av. Floral N° 1153 - Puno



## INFORME DE ANALISIS DE AGUA

N° 01- LA136

**ASUNTO:** Análisis de metales pesados (As, Hg, Fe, Pb y Cr) por Espectrofotómetro De Emisión Atómica Por Plasma Microondas 4210 MP- AES  
**PROCEDENCIA:** Llalimayo  
**INTERESADO:** Oscar Arque Coahuanihanco  
**MOTIVO:** Trabajo de Investigación  
**TELÉFONO:** \*\*\*\*\*

**CÓDIGO DE LABORATORIO:** LMEA - 136  
**N° ORDEN:** LMEA - 4210 - MP - AES  
**FECHA DE INGRESO:** 29 /10/2021  
**FECHA DEL INFORME:** 19/11/2021  
**TIPO DE SERVICIO:** Único

### INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Empaque primario: botella sellada  
Tipo de Muestra: Agua  
Descripción del solicitante: Alto contenido de metales  
Cantidad de muestras: 01

Temperatura de recipiente:  Ambiente  
 Refrigeración

Fecha de inicio de análisis: 29/10/2021

### I. RESULTADOS DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	% RSD	RESULTADOS (nm)
01	Piomo	0.06	2.61	405.781
02	Hierro	10.27	1.26	385.991
03	Arsénico	1.15	10.99	193.695
04	Mercurio	0.23	22.98	253.652
05	Cromo	0.01	4.47	425.438



Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN  
AMBIENTAL  
Central telefónica UNAP (051 599430)  
Av. Floral N° 1153 - Puno



## INFORME DE ANALISIS DE SUELO – RAIZ

N° 02-136

**ASUNTO:** Análisis de metales pesados (As, Hg, Fe, Pb y Cr) por Espectrofotómetro De Emisión Atómica Por Plasma Microondas 4210 MP- AES  
**PROCEDENCIA:** Liallmayo  
**INTERESADO:** Oscar Arque Ccahuanihanoco  
**MOTIVO:** Trabajo de Investigación  
**TELÉFONO:** \*\*\*\*\*

**CÓDIGO DE LABORATORIO:** LMEA - 136  
**N° ORDEN:** LMEA - 4210 - MR - AES  
**FECHA DE INGRESO:** 29/10/2021  
**FECHA DEL INFORME:** 19/11/2021  
**TIPO DE SERVICIO:** Único

### INFORMACION DE LA MUESTRA

Empaque primario: **botella sellada**      temperatura de recipiente:  Ambiente  
Tipo de Muestra: **Agua**       Refrigeración  
Descripción del solicitante: **Alto contenido de metales**      Fecha de inicio de análisis: 29/10/2021  
Cantidad de muestras: 01

### I. RESULTADOS DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (µm)	% RSD	RESULTADOS (nm)
01	Plomo	0.39	1.15	405.781
02	Hierro	> 184.47	0.92	385.991
03	Arsénico	0.53	28.14	193.695
04	Mercurio	< 11.12	21.40	253.652
05	Cromo	0.14	0.22	425.433





Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 001-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (As) por  
Spectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (As).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 01

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Arsénico	0.69	193.695	10.59
02	Arsénico	0.61	193.695	10.59
03	Arsénico	0.70	193.695	10.59
04	Arsénico	0.62	193.695	10.59
05	Arsénico	0.75	193.695	10.59
06	Arsénico	0.68	193.695	10.59
07	Arsénico	0.71	193.695	10.59
08	Arsénico	0.65	193.695	10.59
09	Arsénico	0.64	193.695	10.59
10	Arsénico	0.75	193.695	10.59



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN  
AMBIENTAL  
Central telefónica UNAP (051 599430)  
Av. Floral N° 1153 - Puno



## INFORME DE ANALISIS DE SUELO - RAIZ

N° 03- 138

**ASUNTO:** Análisis de metales pesados (As, Hg) por Espectrofotómetro De Emisión Atómica Por Plasma Microondas 4210 MP-AES  
**PROCEDENCIA:** Liallmayo  
**INTERESADO:** Oscar Arque Ccahuanihanco  
**MOTIVO:** Trabajo de Investigación  
**TELÉFONO:** \*\*\*\*\*

**CÓDIGO DE LABORATORIO:** LMEA - 138  
**N° ORDEN:** LMEA - 4210 - MR - AES  
**FECHA DE INGRESO:** 29 /10/2021  
**FECHA DEL INFORME:** 25/11/2021  
**TIPO DE SERVICIO:** Único

### INFORMACION DE LA MUESTRA

Empaque primario: **Envase sellado**  
Tipo de Muestra: **Suelo - Raiz**  
Descripción del solicitante: **Alto contenido de metales**  
Cantidad de Muestras: **01**

Temperatura de recipiente:  Ambiente  
 Refrigeración

Fecha de inicio de análisis: 25/11/2021

### I. RESULTADOS DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	% RSD	RESULTADOS (nm)
01	Arsénico	1.78	5.07	193.695
02	Mercurio	<8.89	0.77	253.652



*M. Sc. Fidel Huiso Mamani*  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 003-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (As) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de  
metales (As).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:

Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Arsénico	0.72	193.695	10.59
02	Arsénico	0.69	193.695	10.59
03	Arsénico	0.71	193.695	10.59
04	Arsénico	0.66	193.695	10.59
05	Arsénico	0.74	193.695	10.59
06	Arsénico	0.64	193.695	10.59
07	Arsénico	0.69	193.695	10.59
08	Arsénico	0.63	193.695	10.59
09	Arsénico	0.63	193.695	10.59
10	Arsénico	0.74	193.695	10.59



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 002-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (As) por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136 N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES FECHA DE INGRESO: 29/10/2021 FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021 TIPO DE SERVICIO: Único
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada	TEMPERATURA DEL RECIPIENTE: <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Refrigeración
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu	FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (As).	
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10	

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Arsénico	0.76	193.695	10.59
02	Arsénico	0.66	193.695	10.59
03	Arsénico	0.65	193.695	10.59
04	Arsénico	0.68	193.695	10.59
05	Arsénico	0.70	193.695	10.59
06	Arsénico	0.65	193.695	10.59
07	Arsénico	0.68	193.695	10.59
08	Arsénico	0.62	193.695	10.59
09	Arsénico	0.66	193.695	10.59
10	Arsénico	0.74	193.695	10.59



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 004-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (As) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA-4210-MP-AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (As).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Arsénico	0.47	193.695	10.59
02	Arsénico	0.43	193.695	10.59
03	Arsénico	0.55	193.695	10.59
04	Arsénico	0.53	193.695	10.59
05	Arsénico	0.46	193.695	10.59
06	Arsénico	0.44	193.695	10.59
07	Arsénico	0.53	193.695	10.59
08	Arsénico	0.56	193.695	10.59
09	Arsénico	0.51	193.695	10.59
10	Arsénico	0.48	193.695	10.59



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 006-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (As) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (As).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10  
TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración  
FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Arsénico	0.48	193.695	10.59
02	Arsénico	0.42	193.695	10.59
03	Arsénico	0.56	193.695	10.59
04	Arsénico	0.52	193.695	10.59
05	Arsénico	0.45	193.695	10.59
06	Arsénico	0.41	193.695	10.59
07	Arsénico	0.54	193.695	10.59
08	Arsénico	0.53	193.695	10.59
09	Arsénico	0.53	193.695	10.59
10	Arsénico	0.47	193.695	10.59



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 007-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (Hg) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (Hg).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Mercurio	0.021	253.652	21.40
02	Mercurio	0.019	253.652	21.40
03	Mercurio	0.021	253.652	21.40
04	Mercurio	0.019	253.652	21.40
05	Mercurio	0.022	253.652	21.40
06	Mercurio	0.019	253.652	21.40
07	Mercurio	0.021	253.652	21.40
08	Mercurio	0.019	253.652	21.40
09	Mercurio	0.020	253.652	21.40
10	Mercurio	0.021	253.652	21.40



Universidad Nacional del Altiplano  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL**



**INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)**

**N° 008-LA136**

ASUNTO: Análisis de metales pesados (Hg) por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO	N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO	FECHA DE INGRESO: 29/10/2021
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021
	TIPO DE SERVICIO: Único

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada	TEMPERATURA DEL RECIPIENTE: <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Refrigeración
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu	
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (Hg).	FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10	

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Mercurio	0.024	253.652	21.40
02	Mercurio	0.020	253.652	21.40
03	Mercurio	0.021	253.652	21.40
04	Mercurio	0.020	253.652	21.40
05	Mercurio	0.020	253.652	21.40
06	Mercurio	0.018	253.652	21.40
07	Mercurio	0.020	253.652	21.40
08	Mercurio	0.021	253.652	21.40
09	Mercurio	0.021	253.652	21.40
10	Mercurio	0.020	253.652	21.40



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 009-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (Hg) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (Hg).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Mercurio	0.020	253.652	21.40
02	Mercurio	0.019	253.652	21.40
03	Mercurio	0.020	253.652	21.40
04	Mercurio	0.019	253.652	21.40
05	Mercurio	0.020	253.652	21.40
06	Mercurio	0.019	253.652	21.40
07	Mercurio	0.020	253.652	21.40
08	Mercurio	0.019	253.652	21.40
09	Mercurio	0.020	253.652	21.40
10	Mercurio	0.019	253.652	21.40



Universidad Nacional del Altiplano  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL**



**INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)**

**N° 010-LA136**

ASUNTO: Análisis de metales pesados (Hg) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (Hg).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Mercurio	0.017	253.652	21.40
02	Mercurio	0.015	253.652	21.40
03	Mercurio	0.013	253.652	21.40
04	Mercurio	0.017	253.652	21.40
05	Mercurio	0.015	253.652	21.40
06	Mercurio	0.014	253.652	21.40
07	Mercurio	0.017	253.652	21.40
08	Mercurio	0.014	253.652	21.40
09	Mercurio	0.012	253.652	21.40
10	Mercurio	0.021	253.652	21.40



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 011-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (Hg) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA-4210-MP-AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (Hg).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Mercurio	0.014	253.652	21.40
02	Mercurio	0.017	253.652	21.40
03	Mercurio	0.016	253.652	21.40
04	Mercurio	0.014	253.652	21.40
05	Mercurio	0.019	253.652	21.40
06	Mercurio	0.018	253.652	21.40
07	Mercurio	0.013	253.652	21.40
08	Mercurio	0.017	253.652	21.40
09	Mercurio	0.016	253.652	21.40
10	Mercurio	0.015	253.652	21.40



Universidad Nacional del Altiplano  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECIE VEGETAL (Stipa Ichu)

N° 012-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados (Hg) por  
Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma  
Microondas 4210 MP-AES  
PROCEDENCIA: LLALLIMAYO  
INTERESADO: OSCAR ARQUE CCAHUANIHANCCO  
MOTIVO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136  
N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES  
FECHA DE INGRESO: 29/10/2021  
FECHA DE MUESTREO: 30/11/2021  
TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsa transparente sellada  
TIPO DE MUESTRA: Especie Vegetal Stipa Ichu  
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Alto contenido de metales (Hg).  
CANTIDAD DE MUESTRAS: 10

TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:  Ambiente  
 Refrigeración

FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 29/10/2023

I.- RESULTADO DE ANALISIS

N°	ANALISIS	RESULTADOS (ppm)	Longitud de onda (nm)	% RSD
01	Mercurio	0.016	253.652	21.40
02	Mercurio	0.014	253.652	21.40
03	Mercurio	0.016	253.652	21.40
04	Mercurio	0.015	253.652	21.40
05	Mercurio	0.016	253.652	21.40
06	Mercurio	0.015	253.652	21.40
07	Mercurio	0.015	253.652	21.40
08	Mercurio	0.016	253.652	21.40
09	Mercurio	0.017	253.652	21.40
10	Mercurio	0.017	253.652	21.40

## Anexos 4. Fotografías del desarrollo de la investigación

### Toma de la muestra de agua



### Definición de puntos de muestreo



### Recolección de Muestras



### Rotulado de Muestras



### Identificación de Muestras



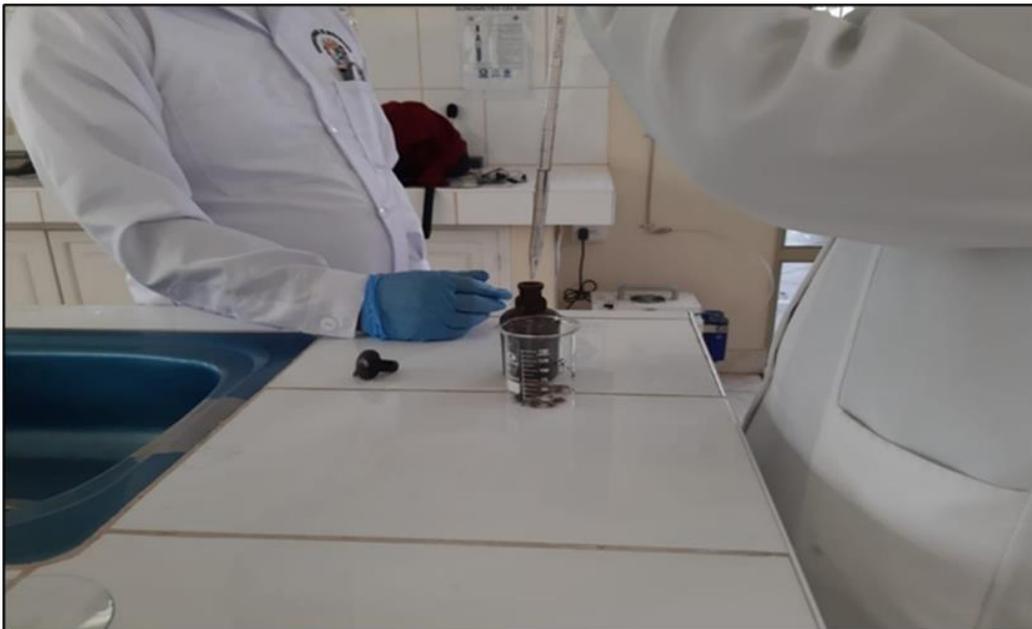
### Análisis de la muestra de agua



### Toma de muestra de suelo-raíz



### Digestión de muestra de suelo-raíz



### Agitación magnética de muestra de suelo-raíz



### Análisis de As y Hg en las muestras suelo-raíz



## Anexos 5. Guía de Muestreo Geobotánico (IGAC)



### GUÍA DE MUESTREO

#### INTRODUCCIÓN

##### Toma de muestras

El muestreo constituye la etapa inicial y fundamental para la adecuada interpretación de los resultados obtenidos en el laboratorio. Pero debido a que el suelo es un material muy heterogéneo, con diferentes condiciones de origen, topografía, manejo, tipos de vegetación, etc.; es necesario definir unidades con características más o menos similares, que permitan establecer lo que se conoce como unidades de muestreo.

En cualquiera de los casos que se presentan a continuación es importante señalar que la técnica con que se realiza el muestreo, depende del objetivo del estudio. De esta forma, se puede decir que hay técnicas para el muestreo de suelos en aspectos como fertilidad, clasificación, física, mineralogía, determinación de micro y macroorganismos, mecánica, etc. Lo mismo sucede si se habla de muestreo de aguas: para potabilidad y para riego; muestreo de tejido vegetal, bien sea para identificar o diagnosticar problemas nutricionales (toxicidad o deficiencias), controlar la evolución de la nutrición de los cultivos, entre otros.

##### Recomendaciones para un buen muestreo

Las indicaciones siguientes se presentan específicamente para fertilidad en el caso del muestreo de suelos, muestreo de aguas con fines de riego y muestreo de tejido vegetal para diagnóstico de problemas nutricionales o enfermedades de las plantas.

Para otros fines, al igual que para realizar análisis físicos, biológicos, mecánicos y mineralógicos, conviene recurrir a especialistas en suelos. Comuníquese con nosotros al teléfono en Bogotá: 3694016 o al correo electrónico del laboratorio: [laboratorio@igac.gov.co](mailto:laboratorio@igac.gov.co) para solicitar información.

### Muestreo de suelos

Separe aquellas áreas con características similares, con base en los siguientes criterios:

- Grado de pendiente
- Grado de erosión
- Tipo de vegetación (edad de la explotación, cultivos anteriores)
- Manejo previo (fertilización, preparación del suelo)
- Presencia de rocas, cuerpos de agua, otros factores.

Si el predio es uniforme en los aspectos anteriores se considera como una unidad para el muestreo un área no mayor de 10 hectáreas, de lo contrario puede subdividirse en áreas de según las diferentes características encontradas, para cada una de las cuales se efectúa el muestreo (Figura 1, punto 1).

La herramienta más apropiada para el muestreo es el barreno, pues con él puede mantenerse una cantidad y profundidad de muestra por punto bastante homogénea. Sin embargo, si no se cuenta con un barreno, el muestreo puede hacerse con una pala o palín y un balde o lona limpios y procurando tomar una cantidad similar de suelo en cada punto y a la misma profundidad (Figura 1, punto 2).

El tipo de muestreo más adecuado y sencillo para su aplicación es en zig-zag. En este método se toman unas 15 ó 20 submuestras a lo largo y ancho del terreno que luego se mezclan en el balde o lona (Figura 1, punto 3).



Para la toma de muestras con pala, abra un hoyo de aproximadamente 25 x 25 cm de lado y 20 cm de profundidad, retire los 2 cm primeros del suelo y extraiga la muestra. En general la profundidad de muestreo está entre 2 y 20 cm que es el área de acción de las raíces. Sin embargo, los pastos acostumbran muestrearse a menor profundidad (0-10 cm) y para algunos cultivos perennes puede ser importante realizar muestreos más profundos (Figura 1, punto 4).

Mezcle en un balde las submuestras hasta obtener una muestra compuesta homogénea (Figura 1, punto 5).

Empaque aproximadamente 1 kg en bolsas plásticas o de papel encerado que no hayan sido usadas antes. No usar bolsas o empaques que contengan fertilizantes u otras sustancias químicas (herbicidas, pesticidas, enmiendas, etc.). Proceda a identificar la muestra en forma concisa y exacta; precise el número de lote o predio, el cultivo o uso actual y el tipo y la cantidad de fertilizantes y enmiendas aplicadas. El rótulo de

identificación no debe estar en contacto directo con el suelo a analizar (Figura 1, punto 6).



Figura 1. Procedimiento a seguir para obtener una muestra de suelo que represente el área que desea analizar con fines agropecuarios.

### Muestreo de aguas para análisis fisicoquímico y biológico

Los aspectos más importantes en la toma de muestras de agua son:

1. Evitar la excesiva manipulación de las muestras para reducir los riesgos de deterioro o contaminación antes de que estas lleguen al laboratorio.



2. Procurar que el tiempo entre la toma de la muestra y su entrega al laboratorio sea mínimo, para asegurar que las determinaciones analíticas sean rápidas y confiables, especialmente cuando se trate de elementos presentes en pequeñas cantidades o análisis biológicos. Si no se puede llevar la muestra inmediatamente al laboratorio es conveniente mantenerla en un lugar fresco y oscuro, preferiblemente refrigerada a 4°C; durante el menor tiempo posible. Algunas determinaciones exigen analizar inmediatamente las muestras, por ejemplo, Carbono total, Carbono Orgánico, Nitratos, Nitritos, pH, Salinidad, Turbidez, Yodo, entre otras.
3. Tomar una muestra representativa del agua que se necesite analizar.
4. El envase puede ser plástico o de vidrio según el tipo de análisis y no debe haber sido empleado anteriormente.
5. Mantenga cerrado el recipiente colector hasta el momento del muestreo. Quite el tapón o la tapa evitando contaminación en la superficie interna y el cuello de envase. Llène el envase, purgue 2 ó 3 veces y tape inmediatamente.
6. Colecte la muestra dejando un amplio espacio de aire en el envase para permitir la expansión y para facilitar la mezcla por agitación antes de realizar el análisis. Tenga cuidado en no alterar el lugar de toma de la muestra. Para muestras que contengan compuestos orgánicos se debe preferir el material de vidrio.
7. El volumen de la muestra deberá ser suficiente para llevar a cabo todas las pruebas requeridas, no debe ser inferior de 500 mL.
8. Deben colectarse muestras separadas para análisis químicos y biológicos cuando se van a ordenar de ambos tipos.

#### Especificaciones para muestreo de agua potable:

Abra el grifo o llave completamente y deje correr el agua por 2 o 3 minutos, para permitir limpiar la línea de servicio. Reduzca el flujo de agua para permitir el llenado de la botella sin salpicar. Si la limpieza del grifo es cuestionable, o se requiere para fines especiales de muestreo, desinfecte el borde de la llave del grifo antes del muestreo con hipoclorito de sodio (blanqueador). Deje correr el agua mínimo 3 minutos después del tratamiento.

La recolección de muestras de un pozo se hace después de haber bombeado durante este lapso de tiempo cercano a los 10 minutos.

#### Agua natural:

Cuando se toman muestras de un río, arroyo, lago, reservorio o corriente superficial, se recomienda muestrear en el centro de la corriente a una profundidad media, si solo puede hacerse una toma pequeña. No es conveniente tomar muestras demasiado cerca de la orilla o demasiado lejos del punto de drenaje al igual que por encima o por debajo de este punto. Si se dispone del equipo adecuado, lo mejor es hacer una toma "integral" desde la superficie al fondo, en la zona media de la corriente. Este muestreo es importante especialmente para la determinación de sólidos en suspensión. Como única precaución, se aconseja no colocar el envase recolector en dirección de la corriente.

La elección del lugar de muestreo en reservorios, lagos y pantanos dependerá de las condiciones locales y del objetivo del estudio. En cualquier caso, se debe evitar tomar la espuma superficial y las áreas de turbulencia excesiva.

Si de antemano se sabe que hay componentes tóxicos en el agua, debe tomarse las precauciones necesarias para manipular las muestras, como el contacto directo con la piel y colocar una nota informativa en el rotulo de identificación del envase.



### Agua no potable:

Quando se toman muestras de un río, arroyo, lago o reservorio, mediante una botella, debe tomar el recipiente en su mano y hundirlo de tal forma que el cuello de la botella quede hacia abajo, y debajo de la superficie del agua; luego gire la botella con dirección contra la corriente. Si no hay corriente, como en el caso de un reservorio, cree, una corriente artificial empujando hacia adelante botella horizontalmente en una dirección opuesta a la mano.

## Muestreo tejido vegetal para análisis químico

La capacidad de la planta para absorber nutrientes en un medio ambiente se refleja en la concentración de éstos de la planta en cualquier momento de su ciclo vegetativo. Las dos técnicas, ensayo de suelos y análisis de tejido vegetal, pueden evaluar de manera efectiva, el ambiente nutricional suelo - planta, al confirmar el requerimiento de un nutriente particular especificando un tratamiento correctivo.

El procedimiento de muestreo, como en los casos anteriores, dependerá también del objetivo del estudio y en lo posible debe consultarse a un técnico para asegurar que la toma de muestras del cultivo en particular corresponda a los requerimientos previstos. Aquí se presentan algunas instrucciones generales para el muestreo de tejido vegetal.

**1. Elección de la parte de la planta a muestrear:** En realidad, cualquier parte de la planta puede ser tomada y analizada en el laboratorio; sin embargo, son las hojas las que son consideradas como mejores indicadores, ya que es en ellas donde se concentra la producción de "fotosintatos", o sea la principal actividad fisiológica de la planta, por lo tanto, cualquier problema que tenga la planta, probablemente se reflejará, en primera instancia, en este órgano. Además, es necesario tener en cuenta que la concentración de los elementos en las hojas varía de acuerdo con factores como edad fisiológica de la hoja, posición en la planta, parte de la hoja, etapa del cultivo, efecto de factores ambientales y de suelo, etc.

En general, se prefieren las hojas totalmente desarrolladas o maduras, localizadas justamente por debajo de la yema de crecimiento en las ramas principales o en los tallos. Para pastos se recomienda tomar las muestras a ras de la superficie del suelo. La semilla, normalmente no se utiliza para el análisis, aunque el estado nutricional de plantas jóvenes ha sido evaluado con éxito para Mo y Zn.

El muestreo se recomienda normalmente poco antes o en la época en que la planta comienza su floración o la fase reproductiva. Los tejidos muertos no se incluyen en la recolección de la muestra. No se recomienda el muestreo cuando las plantas están bajo estrés de un nutriente, de humedad o de temperatura. Las plantas bajo prolongados períodos de estrés, desarrollan concentraciones extraordinarias de nutrientes, que pueden ser erróneos o difíciles de interpretar.

Quando aparecen síntomas o se sospecha de una deficiencia o una toxicidad por un nutriente, lo mejor es solicitar el análisis tanto del tejido vegetal afectado, como de uno similar de plantas normales, que facilite la interpretación comparativa de los resultados.

La cantidad de hojas frescas que se requiere es de 200 gramos, de manera que pueda ofrecer al menos 25 g de materia seca para el análisis. Esta cantidad resultará de mezclar y homogeneizar las submuestras (entre 20 y 50g de cada una) que conforman una muestra representativa.

**2. Número de muestras:** Los criterios de definición de la "unidad de muestreo" son muy parecidos a los aplicados en el muestreo de suelos; en el caso del muestreo de plantas, el número de muestras obedece generalmente a la extensión del cultivo y la variedad de condiciones ambientales a las cuales se encuentren sometidas las plantas.



**3. Almacenamiento y preservación:** Las muestras de tejido vegetal no deben ser lavadas. Se aconseja empacar las hojas secas al aire en bolsas de plástico perforadas, debidamente identificadas, y no en bolsas plásticas para evitar que el agua que se produce durante el proceso de respiración del tejido ayude a descomponerlas y dañar la muestra.

### Muestreo suelo para análisis de fauna

Las muestras del suelo se colectan en submuestras de 10 x 10 x 15 cm de profundidad, utilizando una pequeña pala y tomando un peso de aproximadamente 300 g. Así, doce sub-muestras por hectárea de diferentes puntos se colocan en una bolsa de lona o en una caja de cartón.

Se debe evitar que la muestra quede expuesta a sol directo durante el muestreo en el campo; también se deben proteger de la lluvia y el apiastamiento durante el traslado.

### Muestreo para análisis de micorrizas

**Esporas en suelo:** Proceda de la manera indicada para el muestreo de suelos, pero teniendo en cuenta que si el muestreo se realiza en cercanía a una planta, tenderán a predominar las esporas de micorrizas asociadas a ella. De preferencia envíe las muestras refrigeradas o garantizando un lapso de tiempo inferior a 72 horas desde la toma de la muestra hasta la llegada al laboratorio para evitar efectos negativos en los resultados.

**Colonización de raíces:** Seleccione la(s) planta(s) a muestrear. Determine la forma de crecimiento de las raíces (superficial o profunda) y trate de llegar a ellas de manera cuidadosa. Corte dos o tres puñados de las raíces o raicillas más finas. Retire el exceso de suelo enjuagándolas con agua y seque ligeramente con papel absorbente. Empaquelas en bolsa plástica de cierre hermético, añadiendo 3 cucharadas de vinagre de cocina y 3 cucharadas de alcohol antiséptico.

### Muestreo de compost

Con el fin de conocer la condición promedio del compost, colecte pequeñas cantidades de muestra de iguales proporciones en diferentes zonas de la pila o tonel de compost; seleccione no menos de 15 puntos diferentes a lo largo del perímetro y también desde la base hacia la superficie. Evite coleccionar muestras con humedad atípica (>60%). Emplee únicamente implementos limpios y estériles o cuando menos, desinfectados. Empaque en bolsas de cierre hermético o bolsas zip de 2 Kg de capacidad agitando o aireando la muestra lo menos posible.

Envíe o lleve las muestras al laboratorio antes de 24 horas de la toma de la muestra. En caso de que por distancia u otras razones no sea posible cumplir con este tiempo, mantenga la muestra refrigerada hasta su entrega.

Nota: para identificar puntos de variabilidad extrema o zonas problemáticas tome la muestra solo en el(los) sitio(s) específico(s) de la pila o tonel, no recomendable para evaluación de la calidad del compost solo para estandarización.

### Muestreo tejido vegetal para análisis biológicos

- Tome porciones de las partes afectadas de la planta o de ser posible la planta completa en su sustrato original. La planta o sus partes deben encontrarse vivas aunque estén afectadas por la enfermedad.
- Si se trata de partes vegetales, introdúzcalas en una bolsa plástica acompañada de una mota de algodón humedecido.
- Selle la bolsa y márquela.



- Enviela lo más pronto posible al laboratorio.
- Al llegar solicite la presencia del profesional en biología y bríndele información acerca del cultivo, las condiciones ambientales en que han sido observadas las alteraciones, y los signos que presenta la planta.

Tenga en cuenta además la cantidad de muestra requerida para la ejecución de análisis:

CANTIDAD DE MUESTRA REQUERIDA PARA EJECUCION DE ANALISIS Y SU CUIDADO				
ÁREA	ANÁLISIS	CANTIDAD MÍNIMA	CANTIDAD MÁXIMA	REQUERIMIENTO
QUÍMICA	Abono orgánico líquido	500 mL	500 mL	Refrigerar
	Agua para riego	500 mL	1L	Envasado en botella nueva – Mantener refrigerada desde la toma de la muestra
	Tejido vegetal	200 g	300 g	ninguno
	Q-01, Q-02, Q-03, Q-04, Q-63	1 Kg	1 Kg	ninguno
	Salinidad suelos (Q-19)	2 Kg	2 Kg	ninguno
	Sulfatos o cloruros en suelos (Q-10)	500 g	700g	ninguno
	Suelos	500 g	1 Kg	Procesar antes de 2 días, sino, refrigerar
BIOLOGÍA	Suelos para fauna	400 g	800 g	Entregar antes de 3 días de haber colectado, la bolsa debe perforarse
	Compost	1 Kg	2Kg	Entregar antes de 24 horas o en caso contrario refrigerar
	Agua / Compuestos líquidos	500 mL	1L	Envasado en botella nueva – Mantener refrigerada desde la toma de la muestra
	Hojarasca	300 g	700 g	Manipulación cuidadosa, hacer punciones finas a la bolsa
	Plantas para análisis fitopatológico	Parte o porción de la planta afectada	Planta completa	La planta debe encontrarse aún viva, no se puede procesar si el tejido está en descomposición
MINERALOGÍA	Análisis micromorfológico	Bloque de suelo orientado de 10 x 10 x 10 cm	N.A.	Manipulación mínima y cuidadosa
	Análisis mineralógico (arcillas y/o arenas)	100 g	250 g	ninguno
	M-08 (muestra de polvo total)	50g	100g	ninguna
	M-11	300 g	400 g	ninguno



FÍSICA E INGENIERÍA	Estabilidad estructural (F-06)	Bloque Indisturbado de 10 x 10 x 10 cm aproximadamente o en su defecto terrones de suelo de diámetro aprox. 10 cm	N.A.	Manipulación mínima y cuidadosa, embalaje adecuado para evitar posible compactación o disturbación
	Conductividad hidráulica (F-08)	2 Anillos de pared delgada (1 mm) preferiblemente metálico con borde cortante de 5 x 5 cm, se debe indicar la orientación de la muestra	N.A.	
	Densidad aparente método del terrón (F-02)	Terrón de diámetro aproximado 10 a 20 cm	N.A.	
	Densidad aparente método del cilindro (F-18)	Anillo de pared delgada (1 mm) preferiblemente metálico con borde cortante de 5 x 5 cm,	N.A.	
	Porosidad Intraagregados (F-10)	Terrón de diámetro aproximado 5 cm	N.A.	
	Resistencia compresión Inconfinada (I-02)	Probeta de sección constante circular o cuadrada, diámetro o lado $\geq$ 30 mm, relación altura/diámetro o lado de la base entre 2 a 3	N.A.	
	Peso unitario seco o total (I-09)	Terrón de diámetro aproximado 10 a 20 cm	N.A.	
	Retención de humedad (F-01)	50g de suelo por c/u de la tensión solicitada	N.A.	Ninguno
	Densidad Real (F-03)	100 g	150 g	
	Granulometría por pipeta (F-04)	100g	300g	
	Coefficiente de Extensibilidad lineal COLE (F-05)	200g	300g	
	Límites de Consistencia de Atterberg, Líquido y plástico (F-07)	200 g	300 g	
	Humedad de campo (F-14)	100 g	200 g	Empaque hermético
	Textura por Bouyoucos (F-15)	200 g	300 g	Ninguno
	Ensayo de compactación de Proctor (I-01)	50 Kg	60Kg	
CBR: suelos expansivos-cohesivos (I-03) / suelos granulares) (I-04)	100 Kg	120 Kg		



	Granulometría por tamizado mecánico con lavado (I-05) /sin lavado (I-06)	Si el material es: Fino: 2 kg Granular: 3 a 5 kg Gran presencia de gravas: 5 a 10kg	N.A
	Análisis granulométrico por hidrómetro con peso específico (I-07)	200 g	300 g
	Peso específico de los sólidos (I-08)	100 g	200 g

*Nota 1: El cliente debe traer la muestra en bolsas separadas según tipo de análisis (Química, física, mineralogía, biología).*

*Nota 2: En caso de que para una muestra se solicite más de un paquete de análisis, la cantidad de muestra requerida corresponde a la suma de las cantidades indicadas para cada paquete analítico o tipo de análisis.*

Otras muestras: comunicarse al teléfono: 3694016 con el profesional del área respectiva (química (ext. 91261), física (91254), mineralogía (91551) o biología (91676)) o al correo electrónico: [laboratorio@igac.gov.co](mailto:laboratorio@igac.gov.co).

## Anexos 6. Protocolo de Métodos de Análisis de la Universidad de Concepción - Chile



GOBIERNO DE CHILE  
SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO  
SAG



### PROTOCOLO DE MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA SUELOS Y LODOS

Universidad de Concepción Facultad de de Agronomía Chillán.  
Erick Zagal<sup>1</sup>, Angélica Sadzawka R<sup>2</sup>

Elaborado con la participación de la Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo por encargo del Servicio Agrícola y Ganadero.

2007

## 7. DIGESTIONES

### 7.1. Con ácido nítrico-ácido perclórico (lodos y suelos)

#### 1 Principio y alcance

- 1.1 La muestra seca y molida, de lodo o de suelo, se digiere con ácido nítrico y ácido perclórico. En el digerido se pueden determinar las concentraciones de As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn.
- 1.2 Este procedimiento es aplicable a todos los tipos de suelos y a los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.

#### 2 Equipos y materiales especiales

- 2.1 Digestor de tubos.
- 2.2 Tubos de digestión de vidrio de 250 mL de capacidad, con tapones de teflón y tubos refrigerantes para permitir la condensación de vapores.
- 2.3 Discos filtro de tamaño de poro <25  $\mu\text{m}$ .

#### 3 Reactivos

Deben usarse solamente reactivos de grado analítico o grado para trazas.

Todas las referencias a "agua" se refieren a agua reactivo que debe cumplir los requisitos dados por ASTM D1193 (1999) Tipo I o ISO 3696 (1987) Grado 1 (CE máxima 0,08 – 0,1  $\mu\text{S/cm}$  (0,008 – 0,01 mS/m)).

- 3.1 Ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$  100 %, densidad 1,52 kg/L.
- 3.2 Ácido perclórico,  $\text{HClO}_4$  70%, densidad 1,66 kg/L.
- 3.3 Solución para fortificar.

A un matraz aforado de 100 mL agregar:

- alrededor de 50 mL de agua,
- 1 mL de ácido nítrico (3.1),
- 5 ml de solución estándar de 10 mg/L de As (Método 9.1.1, punto 4.4),
- 1 mL de solución estándar de 10 mg/L de Cd (Método 9.2.1, punto 4.8),
- 1 mL de solución estándar de 1000 mg/L de Zn (Método 9.3.1, punto 4.2),
- 5 mL de solución estándar de 1000 mg/L de Cu (Método 9.4.1, punto 4.2),
- 5 mL de solución estándar de 1000 mg/L de Ni (Método 9.6.1, punto 4.2),
- 10 mL de solución estándar de 1000 mg/L de Pb (Método 9.7.1, punto 4.2),
- 5 mL de solución estándar de 10 mg/L de Se (Método 9.8.1, punto 4.4),
- agua hasta enrasar.

Esta solución para fortificar contiene:

- 500  $\mu\text{g/L}$  de As,
- 100  $\mu\text{g/L}$  de Cd,
- 10 mg/L de Zn,
- 50 mg/L de Cu,
- 50 mg/L de Ni,
- 100 mg/L de Pb y
- 500  $\mu\text{g/L}$  de Se.

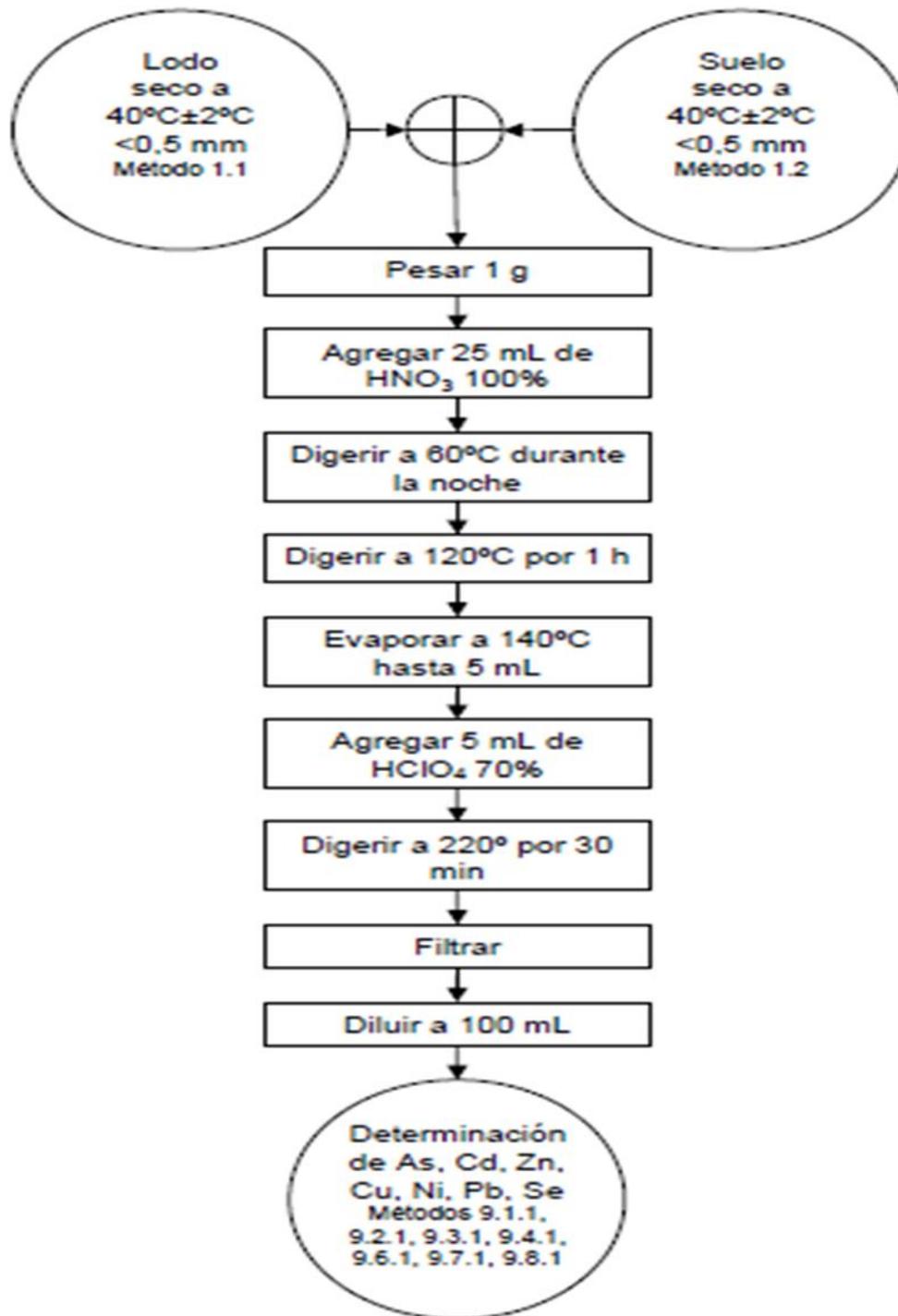


Figura 7.1-1. Diagrama de flujo del Método 7.1.

- 4.1 En tubos de digestión (2.2), pesar alrededor de 1 g (exactitud 0,01g) de muestra seca a  $40^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $<0,5$  mm de lodo (Método 1.1 punto 4.9), o de suelo (Método 1.2, punto 3.6). Incluir 1 blanco, 1 muestra de referencia fortificada con 2 mL de solución para fortificar (3.3), 1 de las muestras de la tanda fortificada con 2 mL de solución para fortificar (3.3) y 1 duplicado de esta muestra fortificada con 2 mL de solución para fortificar (3.3).
- 4.2 Agregar 25 mL de  $\text{HNO}_3$  100% (3.1) y agitar manualmente el matraz para homogenizar la muestra.
- 4.3 Colocar los tapones de teflón con los refrigerantes.
- 4.4 Digerir a  $60^{\circ}\text{C}$  durante la noche. Mezclar bien.
- 4.5 Digerir a  $120^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora. Enfriar, mezclar y remover los refrigerantes.
- 4.6 Calentar a  $140^{\circ}\text{C}$  hasta que quede un volumen de alrededor de 5 mL.
- 4.7 Enfriar a menos de  $60^{\circ}\text{C}$ .
- 4.8 Agregar cuidadosamente 5 mL de  $\text{HClO}_4$  70% (3.2), colocar nuevamente los refrigerantes y digerir a  $220^{\circ}\text{C}$  durante 30 min.

**Nota 1**

El período de predigestión, el uso de refrigerantes y el aumento progresivo del poder oxidante, combinando ácidos y temperaturas, evita la formación de compuesto volátiles de As y Se.

**Nota 2**

No debe usarse ácido perclórico en campanas de extracción de madera por el peligro de explosión.

- 4.9 Enfriar y lavar los refrigerantes y las paredes de los tubos con agua.
- 4.10 Filtrar y enrasar con agua a 100 mL.

**Nota 3**

En el filtrado se pueden determinar las concentraciones de As (Método 9.1.1), Cd (Método 9.2.1), Cu (Método 9.4.1), Ni (Método 9.6.1), Pb (Método 9.7.1), Se (Método 9.8.1) y Zn (Método 9.3.1).

## 5 Bibliografía

- 5.1 ASTM D1193. 1999. Standard specification for reagent water. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 3 p.
- 5.2 EPA (United States Environmental Protection Agency). 1996. Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. Revision 2. *In: Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846, Volume 1, Section A, Part I, Chapter 3, 3050B-1 – 3050B-12.*
- 5.3 ISO 3696. 1987. Water for analytical use. Specification and test methods. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 5 p.
- 5.4 TMECC Method 04.12. 2002. Digestion techniques. *In: The United States Composting Council. Test Methods for the Examination of Composting and Compost, New York, USA.*
- 5.5 Verlinden, M. 1982. On the acid decomposition of human blood and plasma for the determination of selenium. *Talanta* 29: 875–882.

## 9.1 Arsénico

### 9.1.1 EAA electrotérmica (lodos y suelos)

#### 1 Principio y alcance

- 1.1 En el digerido proveniente del Método 7.1 o del Método 7.2 se determina la concentración de arsénico por espectrofotometría de absorción atómica electrotérmica (con horno de grafito), previa adición de una solución de nitrato de níquel para minimizar las pérdidas por volatilización de As.
- 1.2 Este método es aplicable en la determinación de arsénico en lodos generados de plantas de tratamiento de aguas servidas y en suelos.
- 1.3 Este método tiene un límite de detección instrumental de 1 µg/L o menor y un rango óptimo de concentración de 5 µg/L a 100 µg/L.
- 1.4 El Proyecto Reglamento de CONAMA establece que la concentración máxima permitida de arsénico en:
  - 1.4.1 Lodos es de 20 mg/kg de As para la aplicación en suelos con severas limitaciones para uso agrícola o en suelos forestales. Para la aplicación en suelos degradados, la concentración máxima permitida de arsénico en lodos es de 40 mg/kg de As.
  - 1.4.2 Suelos receptores de lodos de la macrozona norte es de 20 mg/kg de As, si el pH del suelo es mayor de 6,5, y de 12,5 mg/kg de As, si el pH del suelo es menor o igual a 6,5. Para los suelos receptores de lodos de la macrozona sur de pH mayor de 5, la concentración máxima permitida de arsénico es de 10 mg/kg de As.

#### 2 Interferencias

- 2.1 Ver Método 8.3 punto 2.
- 2.2 El As elemental y muchos de sus compuestos son volátiles, por lo tanto, deben digerirse muestras fortificadas para determinar si el método de disolución es adecuado.
- 2.3 Además de las interferencias normales que ocurren en el análisis con horno de grafito, el análisis de As puede sufrir severa absorción no específica y dispersión de la luz, por lo que debe usarse corrección de fondo.

#### 3 Equipos y materiales especiales

- 3.1 Espectrofotómetro de absorción atómica con horno de grafito (ver Método 8.3, punto 4) con lámpara de arsénico.

#### 4 Reactivos

Durante el análisis, usar solamente reactivos para análisis de trazas y agua reactivo Tipo I de ASTM D1193 (1999) o Grado 1 de ISO 3698 (1987) (CE máxima 0,08 – 0,1 µS/cm (0,008 – 0,01 mS/m)).

- 4.1 Ácido nítrico, HNO<sub>3</sub>, 100%, d=1,52 kg/L.
- 4.2 Solución de nitrato de níquel, 0,1% en Ni.  
Disolver 0,5 g de Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O en agua y diluir a 100 mL.
- 4.3 Solución estándar de As de 1000 mg/L = 1 mg/mL.
  - 4.3.1 Disolver 1,320 g de trióxido de arsénico, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en agua que contiene 4 g de hidróxido de sodio, NaOH. Agregar 20 mL de ácido nítrico 100% (4.1) y diluir a 1000 mL.
  - 4.3.2 Disponible en el comercio.

- 4.4 Solución estándar de 10 mg/L de As.  
A un matraz aforado de 1000 mL, agregar:
- 10 mL de la solución estándar de 1000 mg/L de As (4.3),
  - 10 mL de ácido nítrico 100% (4.1),
  - agua hasta enrasar.
- 4.5 Solución estándar de 0,5 mg/L de As.  
A un matraz aforado de 100 mL, agregar:
- 5 mL de la solución estándar de 10 mg/L de As (4.4),
  - 10 mL de ácido nítrico 100% (4.1),
  - agua hasta enrasar.
- 4.6 Serie de estándares de As.  
A 5 matraces aforados de 100 mL agregar:
- 0-1-2-5-10-20 mL de la solución estándar de 0,5 mg/L de As (4.5),
  - 10 mL de ácido nítrico 100% (4.1),
  - agua hasta enrasar.
- Esta serie de estándares contiene 0-5-10-25-50-100 µg/L de As.  
Preparar diariamente.

## 5 Procedimiento

- 5.1 Montar, alinear el horno de grafito y seleccionar las condiciones de operación según las instrucciones del fabricante del espectrofotómetro (3.1). Usar corrección de fondo.
- 5.2 Calibrar el instrumento inyectando un volumen adecuado de cada una de la soluciones de la serie de estándares de As (4.6) con un volumen igual de solución de níquel (4.2). Leer a 193,7 nm cada solución estándar en triplicado para verificar la precisión del método.
- 5.3 Inyectar una alícuota, de volumen igual al usado con la serie de estándares, de los digeridos provenientes del Método 7.1, punto 4.10, o del Método 7.2, punto 4.12. Estos digeridos incluyen los de las muestras, del blanco, de la muestra de referencia fortificada, de una de las muestras de la tanda fortificada y del duplicado de esta muestra fortificada. Inyectar el mismo volumen de solución de níquel (4.2).
- 5.4 Aplicar el programa seleccionado y repetir hasta obtener resultados reproducibles.

### Nota 1

Si la concentración de la muestra es mayor que la de la solución estándar más alta, diluir manteniendo una concentración de ácido nítrico de 10% y reanalizar.

- 5.5 Limpiar el tubo a intervalos regulares durante una serie de determinaciones cuando el blanco detecta efectos de memoria (contaminación cruzada), debido a que el elemento no se ha volatilizado totalmente durante la atomización.

## 6 Cálculos

- 6.1 Examinar los valores obtenidos de concentración de As en los digeridos.

### Nota 2

Si la concentración de As en el blanco del método es menor que el *límite de detección del método* (Método 8.1, Nota 2) o menor que el 10% de la concentración de la muestra más baja en As, cualquiera sea mayor, entonces el blanco del método se puede considerar aceptable. Si no es así, volverlo a leer y si aún es inaceptable, todas las muestras después del último blanco del método aceptable deben repararse y reanalizarse.

### Nota 3

La concentración de As en la muestra de referencia fortificada debe ser igual al valor de referencia más un valor entre 8 µg/L y 12 µg/L de As. Si esto no se cumple, volverla a leer. Si aún es inaceptable, todas las muestras después de la última muestra de referencia aceptable deben repararse y reanalizarse.

La recuperación de As en la muestra fortificada debe estar entre 80% y 120% (8 µg/L y 12 µg/L) y la diferencia relativa con el duplicado de la muestra fortificada debe ser menor del 20%. Si no es así, debe realizarse una de las pruebas de interferencia (Método 8.1, punto 5.5).

- 8.2 Calcular la concentración, expresada en mg/kg, de As total en base a muestra seca a 105°C±5°C, según:

$$\text{As (mg/kg)} = \frac{(a-b) \times v \times d}{m \times 1000} \times Fh$$

donde:

- a = concentración, en µg/L, de As en la muestra
- b = concentración, en µg/L, de As en el blanco
- v = volumen, en mL, de digerido (Método 7.1, punto 4.10 o Método 7.2, punto 4.12)
- d = factor de dilución, si corresponde
- m = masa, en g, de muestra (Método 7.1, punto 4.1 o Método 7.2, punto 4.4)
- Fh = factor de corrección por humedad (Método 2.1, punto 4.1.4 para lodos y punto 4.2.2 para suelos)

## 7 Informes

- 7.1 Informar el resultado obtenido en 8.2, en mg/kg con un decimal, como:

Arsénico total = ... mg/kg de As, en base a muestra seca a 105°C±5°C

## 8 Bibliografía

- 8.1 ASTM D1193. 1999. Standard specification for reagent water. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 3 p.
- 8.2 EPA (United States Environmental Protection Agency). Method 7060A. 1994. Arsenic (atomic absorption, furnace technique). Revision 1. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line.
- 8.3 ISO 3696. 1987. Water for analytical use. Specification and test methods. International Organization for Standardization, Gèneve, Switzerland, 5 p.
- 8.4 TMECC Method 04.06-As. 2001. Arsenic. In: The United States Composting Council. Test Methods for the Examination of Composting and Compost, New York, USA.

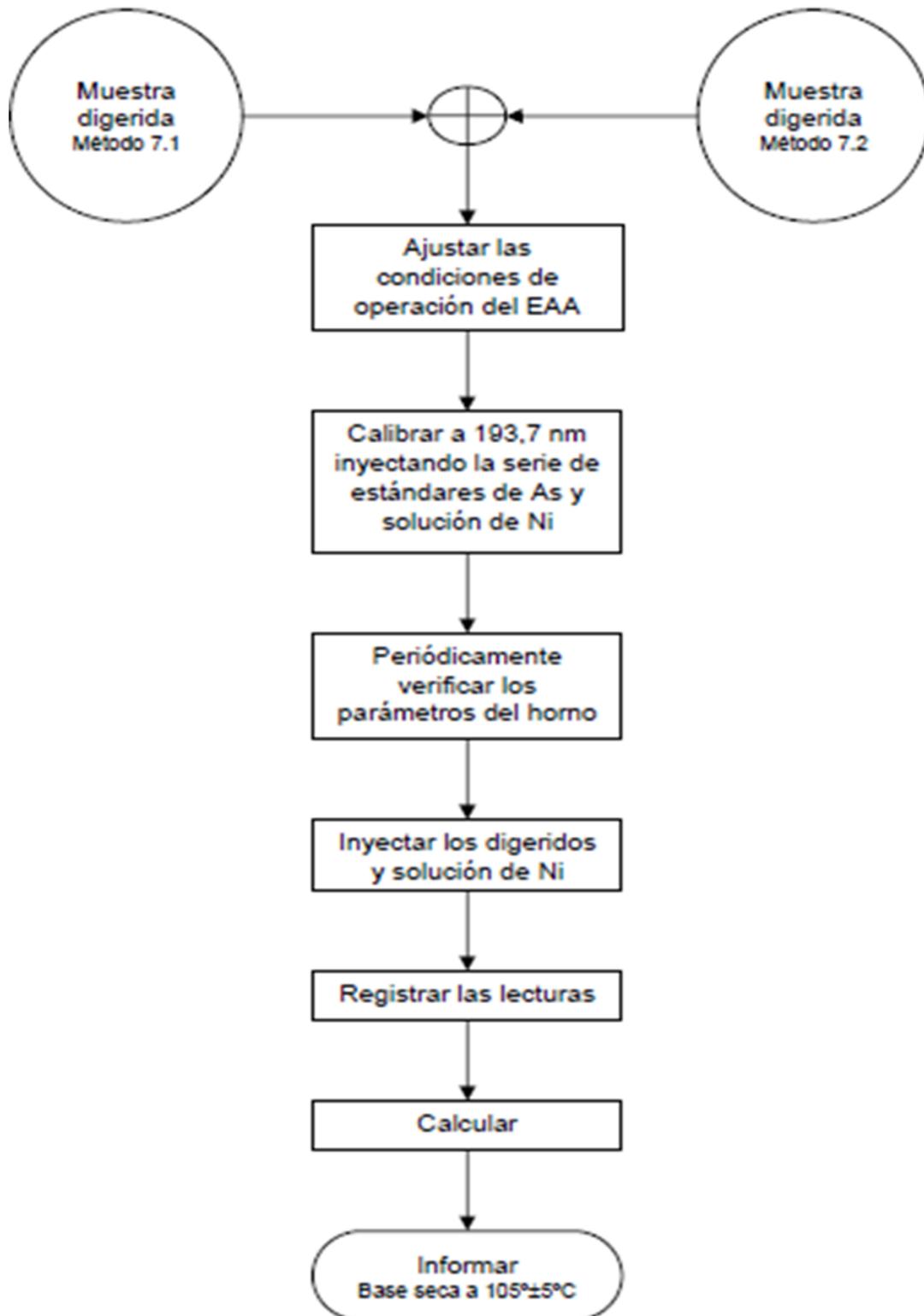


Figura 9.1.1-1. Diagrama de flujo del Método 9.1.1.

- 3.5 Ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ , 98%,  $d=1,84$  kg/L.
- 3.6 Solución de permanganato de potasio,  $KMnO_4$ , 5%.  
Disolver 5 g de  $KMnO_4$  en agua y diluir a 100 L.
- 3.7 Solución de cloruro de sodio e hidroxilamina.  
*Alternativas:*  
3.7.1 Disolver 120 g de NaCl y 120 g de sulfato de hidroxilamina  $(NH_2OH)_2 \cdot H_2SO_4$  en agua y diluir a 1 L, o  
3.7.2 Disolver 120 g de NaCl y 100 g de cloruro de hidroxilamina  $(NH_2OH \cdot HCl)$  en agua y diluir a 1 L.
- 3.8 Solución de ión estanoso,  $Sn^{+2}$ .  
*Alternativas:*  
3.8.1 Disolver 10 g de cloruro estanoso,  $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ , en agua que contiene 5 mL de ácido clorhídrico 30% (3.1) y diluir a 100 mL con agua, o  
3.8.2 Disolver 10 g de sulfato estanoso,  $SnSO_4$ , en agua que contiene 2 mL de ácido sulfúrico 98% (3.5) y diluir a 100 mL con agua.

#### Nota 2

Las soluciones 3.8.1 y 3.8.2 se descomponen con el envejecimiento. Si se forma una suspensión, agitar continuamente durante el uso.

- 3.9 Solución estándar de 1000 mg/L de Hg.  
*Alternativas:*  
3.9.1 Disponible en el comercio, o  
3.9.2 A un matraz aforado de 100 mL agregar:  
- alrededor de 75 mL de agua,  
- 0,1354 g de cloruro mercuríco,  $HgCl_2$  y disolver,  
- 10 mL de ácido nítrico 100% (3.2) y mezclar,  
- agua hasta enrasar.
- 3.10 Solución estándar de 10 mg/L de Hg.  
A un matraz aforado de 100 mL, agregar:  
- 1 mL de ácido nítrico 15% (3.3),  
- 1 mL de la solución estándar de 1000 mg/L de Hg (3.9.1 o 3.9.2) y  
- agua hasta enrasar  
Preparar diariamente.
- 3.11 Solución estándar de 500  $\mu g/L$  de Hg.  
A un matraz aforado de 100 mL, agregar:  
- 1 mL de ácido nítrico 15% (3.3),  
- 5 mL de la solución estándar de 10 mg/L de Hg (3.10),  
- agua hasta enrasar.  
Preparar diariamente.
- 3.12 Serie de estándares de Hg.  
A cinco matraces aforados de 100 mL agregar:  
- 1 mL de ácido nítrico 15% (3.3),  
- 0-1-2-5-10-20 mL de la solución estándar de 500  $\mu g/L$  de Hg (3.11),  
- agua hasta enrasar.  
Preparar diariamente.  
Esta serie de estándares contiene 0-5-10-25-50-100  $\mu g/L$  de Hg.

## 4 Procedimiento

- 4.1 *Alternativamente:*  
4.1.1 Pesar en triplicado 0,2 g (exactitud 0.001) de muestra seca a  $40^\circ C \pm 2^\circ C$  y molida a  $<0,5$  mm de lodo (Método 1.1) o de suelo (Método 1.2), en matraces de reacción (2.5). Incluir 1 blanco, 1 muestra de referencia fortificada con 1 mL de solución estándar de

- 4.2 Transferir 10 mL de la serie de estándares de Hg (3.12) a frascos de reacción (2.5).
- 4.3 Agregar 5 mL de agua regia (3.4).
- 4.4 Calentar en un baño de agua por 2 min a 95°C. Enfriar.
- 4.5 Agregar 50 mL de agua.
- 4.6 Agregar 15 mL de solución de permanganato de potasio (3.6). Mezclar.
- 4.7 Calentar en el baño de agua durante 30 min a 95°C. Enfriar.
- 4.8 Agregar 6 mL de solución de cloruro de sodio e hidroxilamina (3.7).

**Nota 3**

Esta adición debe realizar bajo campana porque puede liberarse Cl<sub>2</sub>.

- 4.9 Agregar 50 mL de agua.
- 4.10 Ajustar las condiciones del espectrofotómetro con los accesorios (2.1) según las instrucciones del fabricante.
- 4.11 Continuar con cada matraz individualmente.
- 4.12 Agregar 5 mL de solución de ión estanoso (3.8.1 o 3.8.2) e inmediatamente conectar el matraz al sistema de aireación.
- 4.13 Sin agitar la muestra, hacer circular el aire. Registrar a 253,7 nm la absorbancia máxima que se alcanza en pocos segundos.
- 4.14 Una vez que la absorbancia vuelve a la línea base, cambiar el matraz por uno con agua y continuar la aireación por algunos segundos.
- 4.15 Repetir los puntos 4.12 a 4.14 con el matraz siguiente.

**Nota 4**

Para la calibración deben colocarse las concentraciones de la serie de estándares indicadas en 3.12.

## 5 Cálculos

- 5.1 Examinar los valores obtenidos de concentración de Hg en los digeridos.

**Nota 5**

Si la concentración de Hg en el blanco el método es menor que el *límite de detección del método* (Método 8.1, Nota 2) o menor que el 10% de la concentración de la muestra más baja en Hg, cualquiera sea mayor, entonces el blanco del método se puede considerar aceptable. Si no es así, volverlo a leer y si aún es inaceptable, todas las muestras después del último blanco del método aceptable deben repararse y reanalizarse.

**Nota 6**

La concentración de Hg en la muestra de referencia fortificada debe ser igual al valor de referencia más un valor entre 8 µg/L y 12 µg/L de Hg. Si esto no se cumple, volverla a leer. Si aún es inaceptable, todas las muestras después de la última muestra de referencia aceptable deben repararse y reanalizarse.

**Nota 7**

La recuperación de Hg en la muestra fortificada debe estar entre 80% y 120% (8 µg/L y 12 µg/L) y la diferencia relativa con el duplicado de la muestra fortificada debe ser menor del 20%. Si no es así, debe realizarse una de las pruebas de interferencia (Método 8.1, punto 5.5).

- 5.2 Calcular la concentración, expresada en mg/kg, de Hg total en base a muestra seca a 105°C±5°C, según:
  - 5.2.1 Para muestras procesadas según el Punto 4.1.1:

$$\text{Hg (mg/kg)} = \frac{(a - b)}{m \times 100} \times Fh$$

donde:

- a = concentración, en µg/L, de Hg en el digerido de la muestra
- b = concentración, en µg/L, de Hg en el blanco
- m = masa, en g, de muestra (4.1.1)
- Fh = factor de corrección por humedad (Método 2.1, punto 4.1.4 para lodos y punto 4.2.2 para suelos)

5.2.2 Para muestras procesadas según el Punto 4.1.2:

$$\text{Hg (mg/kg)} = \frac{(a - b) \times v}{m \times 1000} \times Fh$$

donde:

- a = concentración, en µg/L, de Hg en el digerido de la muestra
- b = concentración, en µg/L, de Hg en el blanco
- v = volumen, en mL, de digerido (Método 7.2, punto 4.12)
- m = masa, en g, de muestra (Método 7.2, punto 4.4)
- Fh = factor de corrección por humedad (Método 2.1, punto 4.1.4 para lodos y punto 4.2.2 para suelos)

## 6 Informes

6.1 Informar el resultado obtenido en 5.2.1 o 5.2.2, en mg/kg con un decimal, como:

Mercurio total = ... mg/kg de Hg, en base a muestra seca a 105°C±5°C

## 7 Bibliografía

- 7.1 ASTM D1193. 1999. Standard specification for reagent water. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 3 p.
- 7.2 EPA (United States Environmental Protection Agency). Method 7471A. 1994. Mercury in solid or semisolid waste (manual cold-vapor technique) Revision 1. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line.
- 7.3 ISO 3696. 1987. Water for analytical use. Specification and test methods. International Organization for Standardization, Gêneve, Switzerland, 5 p.
- 7.4 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21<sup>st</sup> Edition. 2005. 3112 Metals by cold-vapor atomic absorption spectrometry. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Port City Press, Baltimore, Maryland, p: 3-23 a 3-24.

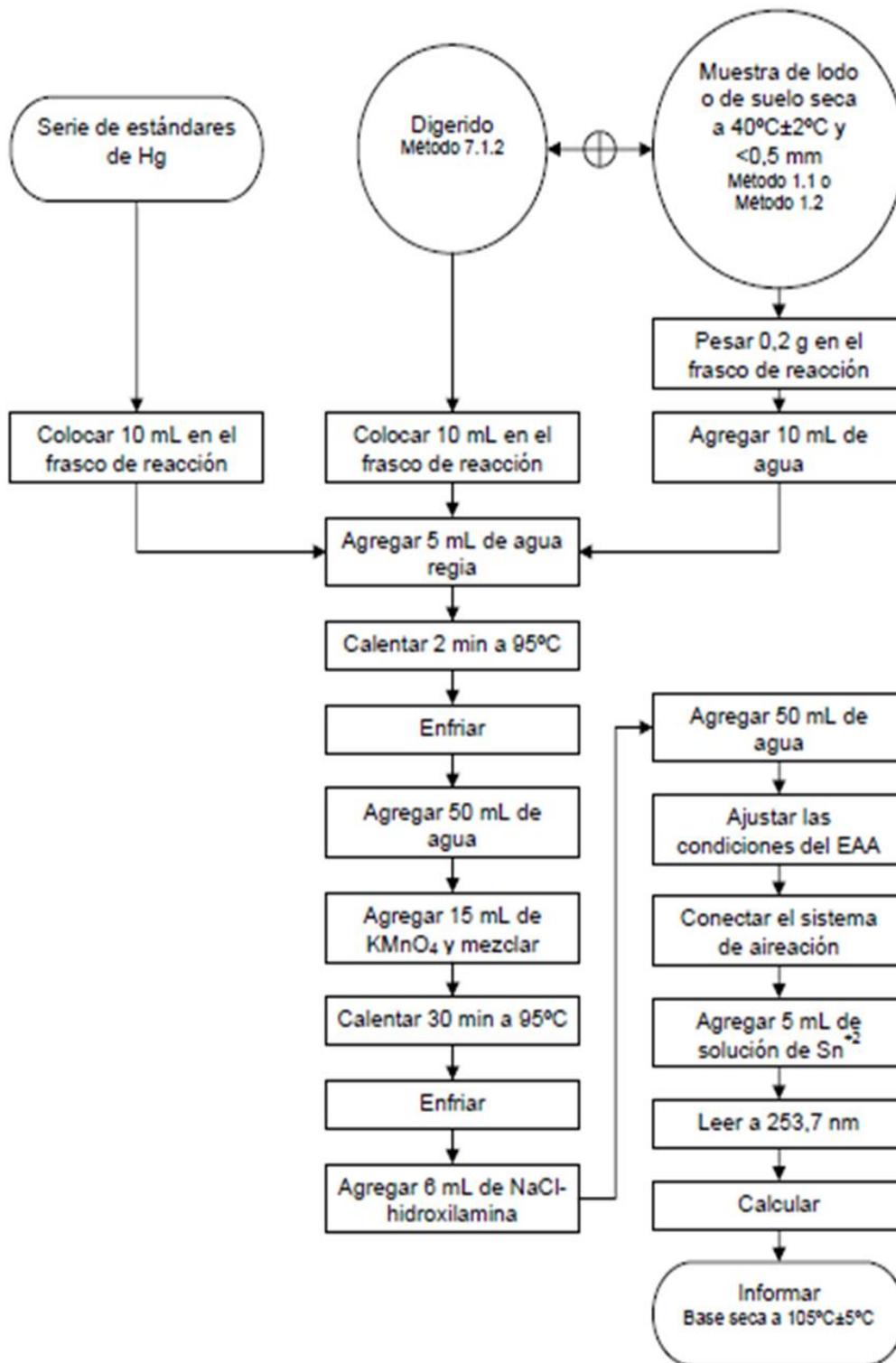


Figura 9.5.1-1. Diagrama de flujo del Método 9.5.1.

## Anexos 7. Coeficientes del estadístico de Shapiro-Wilk

Coeficientes del estadístico de Shapiro-Wilk

Se tabulan los valores de las constantes  $a_{j,n}$ ,  $j = 1, 2, \dots, [n/2]$ ,  $n = 2, 3, \dots$

$j$	$n$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	0'7071	0'7071	0'6872	0'6646	0'6431	0'6233	0'6052	0'5888	0'5739
2	-	-	0'0000	0'1677	0'2413	0'2806	0'3031	0'3164	0'3244	0'3291
3	-	-	-	-	0'0000	0'0875	0'1401	0'1743	0'1976	0'2141
4	-	-	-	-	-	-	0'0000	0'0561	0'0947	0'1224
5	-	-	-	-	-	-	-	-	0'0000	0'0399

$j$	$n$									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0'5601	0'5475	0'5359	0'5251	0'5150	0'5056	0'4968	0'4886	0'4808	0'4734
2	0'3315	0'3325	0'3325	0'3318	0'3306	0'3290	0'3273	0'3253	0'3232	0'3211
3	0'2260	0'2347	0'2412	0'2495	0'2495	0'2521	0'2540	0'2553	0'2561	0'2565
4	0'1429	0'1586	0'1707	0'1802	0'1878	0'1988	0'1988	0'2027	0'2059	0'2085
5	0'0695	0'0922	0'1099	0'1240	0'1353	0'1447	0'1524	0'1587	0'1641	0'1686
6	0'0000	0'0303	0'0539	0'0727	0'0880	0'1005	0'1109	0'1197	0'1271	0'1334
7	-	-	0'0000	0'0240	0'0433	0'0593	0'0725	0'0837	0'0932	0'1013
8	-	-	-	-	0'0000	0'0196	0'0359	0'0496	0'0612	0'0711
9	-	-	-	-	-	-	0'0000	0'0163	0'0303	0'0422
10	-	-	-	-	-	-	-	-	0'0000	0'0140

$j$	$n$									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0'4643	0'4590	0'4542	0'4493	0'4450	0'4407	0'4366	0'4328	0'4291	0'4254
2	0'3185	0'3156	0'3126	0'3098	0'3069	0'3043	0'3018	0'2992	0'2968	0'2944
3	0'2578	0'2571	0'2563	0'2554	0'2543	0'2533	0'2522	0'2510	0'2499	0'2487
4	0'2119	0'2131	0'2139	0'2145	0'2148	0'2151	0'2152	0'2151	0'2150	0'2148
5	0'1736	0'1764	0'1787	0'1807	0'1822	0'1836	0'1848	0'1857	0'1864	0'1870
6	0'1399	0'1443	0'1480	0'1512	0'1539	0'1563	0'1584	0'1601	0'1616	0'1630
7	0'1002	0'1115	0'1201	0'1245	0'1283	0'1316	0'1346	0'1372	0'1395	0'1415
8	0'0804	0'0878	0'0941	0'0997	0'1046	0'1089	0'1128	0'1162	0'1192	0'1219
9	0'0530	0'0618	0'0696	0'0764	0'0823	0'0876	0'0923	0'0965	0'1002	0'1036
10	0'0263	0'0368	0'0469	0'0539	0'0610	0'0672	0'0728	0'0778	0'0822	0'0862
11	0'0000	0'0122	0'0228	0'0321	0'0403	0'0476	0'0540	0'0598	0'0650	0'0697
12	-	-	0'0000	0'0107	0'0200	0'0284	0'0358	0'0424	0'0483	0'0537
13	-	-	-	-	0'0000	0'0094	0'0178	0'0253	0'0320	0'0381
14	-	-	-	-	-	-	0'0000	0'0084	0'0159	0'0227
15	-	-	-	-	-	-	-	-	0'0000	0'0076



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **OSCAR CCAHUANIHANCCO ARQUE** identificado(a) con N° DNI: **43722608** en mi condición de egresado(a) de la:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS - INGENIERÍA QUÍMICA CON MENCIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**

con código de matrícula N° 162760, informo que he elaborado la tesis denominada:

**EVALUAR LA VARIEDAD DE ICHU (STIPA ICHU) COMO BIOINDICADOR DE AS Y HG EN LOS RELAVES MINEROS DE LA CUENCA DEL RÍO LLALLIMAYO – MELGAR-PUNO**

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 21 de Noviembre del 2024.

FIRMA (Obligatorio)



Huella



Universidad Nacional del  
Altiplano Puno



Vicerrectorado de  
Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **OSCAR CCAHUANIHANCCO ARQUE** identificado(a) con N° DNI: **43722608**, en mi condición de egresado(a) del Programa de **Maestría o Doctorado: MAESTRÍA EN CIENCIAS - INGENIERÍA QUÍMICA CON MENCIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**, informo que he elaborado la tesis denominada:

**EVALUAR LA VARIEDAD DE ICHU (STIPA ICHU) COMO BIOINDICADOR DE AS Y HG EN LOS RELAVES MINEROS DE LA CUENCA DEL RÍO LLALLIMAYO – MELGAR– PUNO**

para la obtención de  Grado.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexas, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 21 de Noviembre del 2024.

FIRMA (Obligatorio)



Huella