



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO  
AMBIENTE**



**TESIS**

**CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES BELLUCIA  
PENTÁMERA N., KNIPHOFIA PAUCIFLORA B. Y WEINMANNIA SP. L. DE  
LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023**

**PRESENTADA POR:**

**WILBER PASTOR CONTRERAS**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2023**

## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRE  
S ESPECIES BELLUCIA PENTÁMERA N.,  
KNIPHOFIA PAUCIFLORA B. Y WEINMAN  
N**

AUTOR

**WILBER PASTOR CONTRERAS**

RECUENTO DE PALABRAS

**36045 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**189270 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**150 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**5.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Dec 11, 2023 4:27 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Dec 11, 2023 4:29 PM GMT-5**

### ● 6% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

**VB CIEPG  
Similitud General  
6 %**



**UNA  
PUNO**

Firmado digitalmente por LUQUE  
COYLA Ruben Jared FAU  
20145496170 hard  
Motivo: Doy V° B°  
Fecha: 13.12.2023 12:00:24 -05:00

Universidad  
Nacional  
del Altiplano



Firmado digitalmente por ARIZACA  
AVALOS Americo FAU 20145496170  
soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 11.12.2023 16:32:02 -05:00



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**

**TESIS**

**CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES BELLUCIA  
PENTÁMERA N. KNIPHOFIA PAUCIFLORA B. Y WEINMANNIA SP. L. DE  
LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023**



**PRESENTADA POR**  
**WILBER PASTOR CONTRERAS**  
**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**  
**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

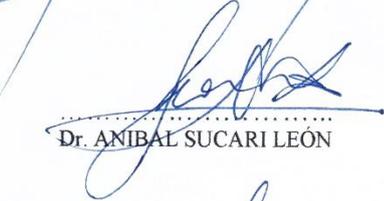
PRESIDENTE

  
D.Sc. EVARISTO MAMANI MAMANI

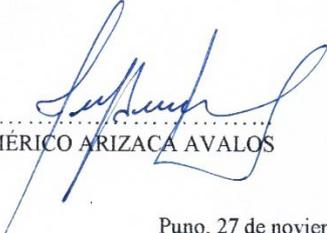
PRIMER MIEMBRO

  
Dr. LUIS VICENTE OLIVERA MAROCHO

SEGUNDO MIEMBRO

  
Dr. ANIBAL SUCARI LEÓN

ASESOR DE TESIS

  
D.Sc. AMÉRICO ARIZACA AVALOS

Puno, 27 de noviembre de 2023

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería  
**TEMA:** Concentración de Mercurio  
**LÍNEA:** Recursos Naturales y Medio Ambiente



## DEDICATORIA

A la memoria de mis amados padres que están en la mejor vida, a Dios por estar mi lado por siempre, quien es mi protector de vida.



## AGRADECIMIENTOS

A nuestro padre celestial por darme nueva oportunidad para aprender, amar y ser cada vez mejor dentro de esta sociedad. A la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, al Posgrado, Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, agradezco especialmente a mi docente Dr. Vladimiro Ibañez Quispe, quien fue mi motor para la realización de este trabajo, a mi asesor; Dr. Américo Arizaca Avalos, por haberme apoyado en resolver los inconvenientes que se presentaron en la elaboración de esta tesis.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	3
1.1.1. Contaminación ambiental	3
1.1.2. Minería artesanal	4
1.1.3. Recuperación metalúrgica	5
1.1.4. Mercurio	5
1.1.5. Mercurio elemental	6
1.1.6. Metilmercurio	7
1.1.7. Mercurio orgánico	7
1.1.8. Mercurio inorgánico	7
1.1.9. Usos del mercurio	8
1.1.10. Mercurio en las plantas	9
1.1.11. Acumulación de mercurio en tejidos vegetales	9
1.1.12. Efectos en la salud de las plantas	9
1.1.13. Impactos en la salud humana por mercurio	10
1.1.14. Mercurio en sedimento	10
1.1.15. Bioacumulación de mercurio en plantas	11
1.1.16. Fitorremediación	12
1.1.17. Fitoestabilización	13
1.1.18. Fitodegradación	13
1.1.19. Fitovolatilización	13
	iii



1.1.20. Fitoextracción	13
1.1.21. Factor de bioconcentración	14
1.1.22. Factor de translocación	14
1.1.23. Factores climáticos en la producción de biomasa	15
1.1.24. Absorción y concentración de metales por las plantas	15
1.1.25. Toxicidad de los contaminantes	16
1.1.26. Modelo phyto DSS	16
1.1.27. Diferencia entre tipos de suelo	17
1.1.28. Estándar de calidad ambiental	18
1.1.29. Diversidades acumuladoras de metales pesados	18
1.1.30. Mecanismos de resistencia a metales	18
1.1.31. ( <i>Bellucia pentámera</i> N.)	19
1.1.32. ( <i>Kniphofia pauciflora</i> B.)	20
1.1.33. ( <i>Weinmannia</i> sp. L.)	21
1.2. Antecedentes	22

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	29
2.2. Enunciados del problema	31
2.2.1. Problema general	31
2.2.2. Problemas específicos	31
2.3. Justificación	31
2.4. Objetivos	32
2.4.1. Objetivo general	32
2.4.2. Objetivos específicos	33
2.5. Hipótesis	33
2.5.1. Hipótesis general	33
2.5.2. Hipótesis específicas	33

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio	34
3.1.1. Ubicación del proyecto	34
3.1.2. Accesibilidad	35



3.1.3. Clima	36
3.1.4. Geología local	36
3.1.5. Estratigrafía	37
3.2. Población	38
3.3. Muestra	38
3.4. Método de investigación	39
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	39
3.5.1. Establecer la capacidad de concentración de mercurio en la especie ( <i>Bellucia pentámera N.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	39
3.5.2. Precisar la capacidad de concentración de mercurio en la especie ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	50
3.5.3. Detectar la capacidad de concentración de mercurio en la especie ( <i>Weinmannia sp. L.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	54

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinar la capacidad de concentración de mercurio de tres especies ( <i>Bellucia pentámera N.</i> ), ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> ) y ( <i>Weinmannia sp. L.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	58
4.1.1. Análisis y diseño (ANOVA)	64
4.1.2. Análisis de varianza para la concentración de Hg en la raíz	66
4.1.3. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk	67
4.1.4. El procedimiento de Duncan	70
4.1.5. Método de ajuste del valor P: Bonferroni	71
4.1.6. Análisis de varianza para la concentración Hg en el tallo	73
4.1.7. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el tallo	74
4.1.8. Prueba de Duncan	76
4.1.9. Método de ajuste del valor P: Bonferroni	77
4.1.10. Análisis de varianza para la concentración de Hg en las hojas	79
4.1.11. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en hojas	80
4.1.12. Método de ajuste del valor P: Bonferroni	82
4.2. Concentración de mercurio en la especie ( <i>Bellucia pentámera N.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	84
4.3. Concentración de mercurio en la especie ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	85



4.4. Concentración de mercurio en la especie ( <i>Weinmannia sp. L.</i> ) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia	88
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	114

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Categorización de tamaños del suelo	17
2. Estándares de calidad ambiental para suelos	18
3. Coordenadas UTM de la zona de estudio	34
4. Acceso al lugar	35
5. Ficha para la recolección de muestras de ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	41
6. Clasificación filogenético de Adolph Engler, ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	42
7. Coordenadas UTM de los puntos de muestreos de ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	43
8. Particularidades a considerar en el monitoreo de especie ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	44
9. Metodología para el análisis de suelo de las especies	49
10. Ficha para la recolección de muestras para ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	51
11. Clasificación filogenético de Adolph Engler, ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	52
12. Coordenadas UTM de los puntos de muestreos para ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	52
13. Ficha para la recolección de muestras para ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	55
14. Clasificación filogenético de Adolph Engler, ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	56
15. Coordenadas UTM de los puntos de muestreos para ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	56
16. Concentración de mercurio en las especies de plantas	59
17. Análisis de varianza – ANOVA para la raíz de las especies	66
18. Comparación de promedios para las tres especies	68
19. Comparación de grupos	69
20. Procedimiento Duncan para la raíz de las especies	70
21. Método de ajuste del valor P: Bonferroni	71
22. Procedimiento Bonferroni para raíz de las especies	72
23. Análisis de varianza – ANOVA para la variable tallo	73
24. Comparaciones de promedios prueba tukey	75
25. Resumen de comparaciones de los grupos	76
26. Prueba de Duncan	77
27. Método de ajuste del valor P: Bonferroni	78
28. Tratamiento de los grupos, Bonferroni	78
29. Análisis de varianza – ANOVA de las especies en hojas	79
30. Pruebas de comparación de los promedios de tres especies	81
31. Resumen de comparaciones de las especies por grupos	82



<b>32.</b> Método de ajuste del valor P: Bonferroni	83
<b>33.</b> Concentración de mercurio en ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	84
<b>34.</b> Concentración de mercurio en ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	86
<b>35.</b> Concentración de mercurio en ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Proceso de recuperación de oro	5
2. Representación esquemática de biotecnológicos	12
3. Absorción y acumulación de PFAS por plantas	15
4. Triángulo USDA	17
5. Mecanismos resistencia a metales pesados mediante plantas	19
6. ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	20
7. ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	20
8. ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	21
9. Mapa de sitio de investigación	35
10. Columna estratigráfica de Sandía (29y) y San Ignacio (29z)	37
11. Micro cuenca San Blas	38
12. Diagrama de flujo de análisis en laboratorio	45
13. Concentración de mercurio en especies extraídas del punto de muestreo 1	60
14. Niveles de mercurio en especies extraídas del punto de muestreo 2	61
15. Acumulación de mercurio en especies extraídas del punto de muestreo 3	62
16. Ubicación de los puntos y la recta cortante	63
17. Sección longitudinal y sitio de los puntos de muestro	64
18. Diagrama de caja para las tres especies	66
19. Análisis de varianza para la concentración de Hg en tallo	73
20. Análisis de varianza para la concentración de Hg en hoja	79
21. Identificación de Hg en ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	85
22. Identificación de Hg en ( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	87
23. Identificación de Hg en ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	89



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. D.S. N° 011-2017 MINAM (ECA)	115
2. Informe de análisis de (Hg) por (DMA) – 80 EVO	117
3. Informe de análisis de (Hg) por plasma microondas 4210 MP-AES	120
4. Certificado de operatividad del plasma microondas 4210 MP-AES	123
5. Certificado de calibración del plasma microondas 4210 MP-AES	124
6. Constancia de nombre de espécimen botánico ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	125
7. Constancia de nombre de espécimen botánico ( <i>Kniphofia pauciflora B</i> )	126
8. Constancia de nombre de espécimen botánico ( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	127
9. Verificación de los supuestos de normalidad de los errores para la raíz	128
10. Validación de supuestos de normalidad de errores para el tallo	128
11. Verificación de los supuestos de normalidad de errores para las hojas	129
12. Quebrada San Blas	130
13. Laboratorio taxonomía de la FCA-UNAP	130
14. Proceso de liofilización de la especie	132
15. Proceso de trituración las especies ( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	133
16. Proceso de digestión de muestra	133
17. Calibración del equipo DMA – 80 y análisis de muestras	134
18. Mezclado de reactivo y filtrado de muestras	134
19. Equipo espectroscopia de emisión óptica con plasma	135



## ABREVIATURAS

<b>Sigla</b>	<b>Denominación</b>
AAS	Espectrofotómetro de absorción atómica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
ECA	Estándares de Calidad Ambiental
EEA	Espectrofotometría por Absorción Atómica
EPA	Agencia de Protección al Ambiente
FIM	Facultad de Ingeniería de Minas
Hg	Mercurio
Hg <sup>+2</sup>	Mercurio divalente
HgS	Sulfuro mercúrico
ICP-AES	Plasma acoplado por inducción ( <i>Advanced Encryption Standard</i> )
mg/kg	Miligramos/kilogramos
MINAM	Ministerio del Ambiente
mm	Milímetros
MP-AES	<i>Agilent microwave plasma atomic emission spectrometers</i>
NTP	Norma Técnica Peruana.
ng/L	Nanogramo por litro
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i>

## RESUMEN

La contaminación ambiental provocada por los efluentes de mercurio utilizados en la minería artesanal, tiene consecuencias ambientales negativas e irreversibles, afectando la salud de la población, la flora y la fauna silvestre. El objetivo fue; determinar la capacidad de absorción de mercurio en tres especies vegetales: (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*) en la quebrada San Blas de la provincia de Sandia. El método fue descriptivo, no experimental y transversal, con un enfoque aplicativo. La metodología de análisis fue por mercurio total y la longitud de onda Hg (435.834 nm), mediante un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma de microondas 4210 MP-AES y un analizador de mercurio, además de un ensayo de digestión multiácida ICP-AES. Los resultados revelaron concentraciones de mercurio para la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) manifestó una alta capacidad de bioacumulación con concentraciones de 13,111 mg/kg en las raíces, 11,807 mg/kg en el tallo y 5,508 mg/kg en las hojas, la especie (*Weinmannia sp. L.*), con 0,728 mg/kg en las raíces, 0,624 mg/kg en el tallo y 0,216 mg/kg en las hojas, (*Bellucia pentámera N.*), presentó concentraciones mínimas de mercurio con 0,566 mg/kg en las raíces, 0,360 mg/kg en el tallo y 0,193 mg/kg en las hojas. En conclusión, la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) destacó por su capacidad significativa de acumular cantidades sustanciales de mercurio a través de su sistema radicular, convirtiéndola en una opción recomendable para la fitorremediación de suelos contaminados por mercurio en comparación con otras especies vegetales.

**Palabras clave:** Contaminación, capacidad de concentración, especies botánicas, medio ambiente, mercurio.

## ABSTRACT

Environmental pollution caused by mercury effluents used in artisanal mining has negative and irreversible environmental consequences, affecting the health of the population, flora and wild fauna. The objective was; determine the mercury absorption capacity in three plant species: (*Bellucia pentamera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) and (*Weinmannia sp. L.*) in the San Blas stream of the province of Sandia. The method was descriptive, non-experimental and transversal, with an applicative approach. The analysis methodology was for total mercury and the Hg wavelength (435,834 nm), using a 4210 MP-AES microwave plasma atomic emission spectrophotometer and a mercury analyzer, in addition to an ICP-AES multi-acid digestion assay. The results revealed mercury concentrations for the species (*Kniphofia pauciflora B.*) showed a high bioaccumulation capacity with concentrations of 13,111 mg/kg in the roots, 11,807 mg/kg in the stem and 5,508 mg/kg in the leaves, the species. (*Weinmannia sp. L.*), with 0.728 mg/kg in the roots, 0.624 mg/kg in the stem and 0.216 mg/kg in the leaves, (*Bellucia pentamera N.*), presented minimum concentrations of mercury with 0.566 mg/kg in the roots, 0.360 mg/kg in the stem and 0.193 mg/kg in the leaves. In conclusion, the species (*Kniphofia pauciflora B.*) stood out for its significant capacity to accumulate substantial amounts of mercury through its root system, making it a recommended option for the phytoremediation of soils contaminated by mercury compared to other plant species.

**Keywords:** Pollution, ability to concentrate, botanical species, environment, mercury.

## INTRODUCCIÓN

La preocupación por la contaminación ambiental, efectos en la salud humana y la biodiversidad ha llevado a una creciente atención sobre la presencia de metales pesados en los ecosistemas naturales. Entre estos metales, el mercurio (Hg) ha ganado una especial relevancia debido a su toxicidad y su capacidad para bioacumularse a lo largo de la cadena alimentaria. El mercurio es un elemento natural presente en la superficie terrestre, por las acciones del hombre, la minería y la ignición de combustibles fósiles, han aumentado significativamente su emancipación en el medio ambiente (Zhu *et al.*, 2020).

En este contexto, la investigación sobre la concentración de mercurio en diferentes especies vegetales, se ha vuelto fundamental para comprender cómo este metal pesado entra en las redes tróficas y cómo afecta a los ecosistemas. En este estudio se consideró tres especies vegetales específicas: (*Bellucia pentamera* N.), (*Kniphofia pauciflora* B.), y (*Weinmannia* Sp. L.). Estas especies se han seleccionado por su importancia en diversos ecosistemas, así como por su capacidad para acumular mercurio en sus tejidos.

Este trabajo de investigación pertenece al área de Ciencias de la Ingeniería, a la línea de investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente, y al tema de Concentración de Mercurio. El objetivo fue determinar la concentración de mercurio en las tres especies en la raíz, el tallo y las hojas, fueron estudiadas las diferencias entre ellas y evaluando su relevancia en términos de la movilización de mercurio en los ecosistemas que se encuentran (Rodríguez, 2018).

Los resultados de este estudio contribuyen al conocimiento científico sobre la distribución y acumulación de mercurio en las especies seleccionadas. La investigación de las plantas como vectores de mercurio es esencial para comprender y mitigar los riesgos ambientales asociados con la contaminación por mercurio (Tong *et al.*, 2021).

El trabajo contiene lo siguiente; En el capítulo I, se presenta de manera concisa el marco teórico en el que se recopilaron las referencias de investigaciones previas realizadas en contextos similares. Estas investigaciones sirven como base para la tesis y se respaldan mediante métodos de validación rigurosos, así como consideraciones teóricas que guían la creación del argumento científico y la importancia del tema de estudio. El segundo capítulo se enfoca en detallar el problema de acuerdo con los objetivos establecidos en esta investigación. En el tercer capítulo, se proporciona una descripción del lugar de trabajo, se expone la población y la muestra utilizada en el estudio, así como el proceso



metodológico que se ha empleado para lograr los objetivos de investigación. También se detallan las variables dependientes e independientes, los equipos y materiales utilizados en la ejecución del trabajo. El cuarto capítulo se dedica a describir los resultados y las discusiones obtenidas en el estudio. Se presentan tablas estadísticas generadas con el software R-Studio, así como los resultados del laboratorio. Finalmente, las conclusiones, las recomendaciones pertinentes, las fuentes consultadas y los anexos relacionados.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

##### 1.1.1. Contaminación ambiental

Es provocada directamente o indirectamente por una actividad en un lugar determinado, mediante la modificación del ambiente ocasionada por el hombre/naturaleza (Quarm *et al.*, 2022). Estos cambios realizados por humanos conducen a la carga sobre los recursos naturales del mundo especialmente las áreas forestales de los países en desarrollo y subdesarrollados (Owusu *et al.*, 2019). La deforestación está aumentando como efecto del rápido crecimiento de la población mundial, el auge de la industria y el uso de energía tradicional (madera, carbón vegetal, carbón) han empleado a más de mil millones de personas y han apoyado a aproximadamente 4,5 millones más, excluyendo a la mayoría de los mineros que operan de manera informal debido al proceso de recuperación del oro por esta razón se ha incrementado el uso de mercurio (Goyzueta & Trigos, 2009).

Tiene como resultado la destrucción de la tierra, la erosión del suelo, la contaminación del agua, la destrucción del ecosistema y entre otros, debido a la zozobra del medio ambiente creado por las operaciones mineras no sostenibles (Rodríguez, 2018). En general, la minería insostenible tiene impactos adversos significativos en la sociedad, la economía y el medio ambiente directamente (Nair *et al.*, 2022). Como resultado es mejor para la industria minera desarrollar estrategias para mitigar los efectos ambientales dañinos (Brutti *et al.*, 2018).

Los daños producidos por la minería ilegal al medio ambiente dependen del método de extracción, el proceso de beneficio, la escala operativa, ubicación y características ambientales entre otros (Pabón *et al.*, 2020).

### **1.1.2. Minería artesanal**

La minería artesanal es una forma de subsistencia de extracción de recursos minerales que utiliza métodos manuales agotadores, como herramientas manejables (Camacho *et al.*, 2016). Se reconoce como una fuente considerable de ingresos para millones de personas en más de 80 países en todo el mundo y en diferentes regiones del mundo, especialmente en el África subsahariana, Oceanía, Asia, América del Sur y Central (Teixeira *et al.*, 2021).

La principal fuente de impacto de los contaminantes en el suelo es la minería. Varios documentos reportan suelos altamente contaminados asociados con actividades mineras alrededor del mundo (Chen *et al.*, 2022). Las infraestructuras de minería y fusión libran cuantías de metales tóxicos al medio ambiente, mientras que las partículas finas de metales pesados tóxicos de la minería se acumulan en los relaves (Durán, 2010). Estas partículas pueden ser dispersadas por el desgaste del viento y el agua y luego llegar a los suelos agrícolas. Por ejemplo, Hg y As se encuentran en altas concentraciones en campos rurales de relaves mineros (Emam *et al.*, 2020).

Los trabajos artesanales acaecen mediante el desarrollo de labores subterráneas de dimensiones menores haciendo uso de pequeñas herramientas, extraen el mineral bruto posterior a ello realizan la molienda del mineral mediante molinos de bola incluyendo el mercurio para la recuperación del oro (Balzino *et al.*, 2015), posteriormente es lavado mediante el giro de una batea y depositándose en la base, luego de ello es quemado a fuego en lugares como; cocinas/dentro de sus viviendas (Espinoza, 2018).

Alrededor de 2,8 millones de sitios están latentemente contaminados, de los cuales alrededor del 14 % requieren una remediación urgente (Pelaez *et al.*, 2013). El uso de “soluciones basadas en la naturaleza” para la remediación, como la biorremediación/fitorremediación, ofrece alternativas que, además de ser más económicas, también son más sostenibles ambientalmente por lo tanto, más beneficiosas a largo plazo (Song *et al.*, 2019).

### 1.1.3. Recuperación metalúrgica

En un escenario secuencial típico como se observa en la (figura 1), los mineros someten primero el mineral entero a los molinos de bola mezclando una pequeña porción de mercurio en líquido, ya sea utilizando su propio equipo o en un centro de procesamiento, con una recuperación del 20 al 40 % del contenido de oro (Zhu *et al.*, 2020). Los relaves de amalgamación, ahora contaminados con mercurio, se venden si los mineros los autoprocésan o los retiene la planta de procesamiento. En cualquier caso, los relaves se reprocessan con cianuro, logrando hasta un 90% de extracción de oro (Gonçalves *et al.*, 2017). Paradójicamente desde una perspectiva técnica, una recuperación análoga podría lograrlo sin el paso de extracción de mercurio.

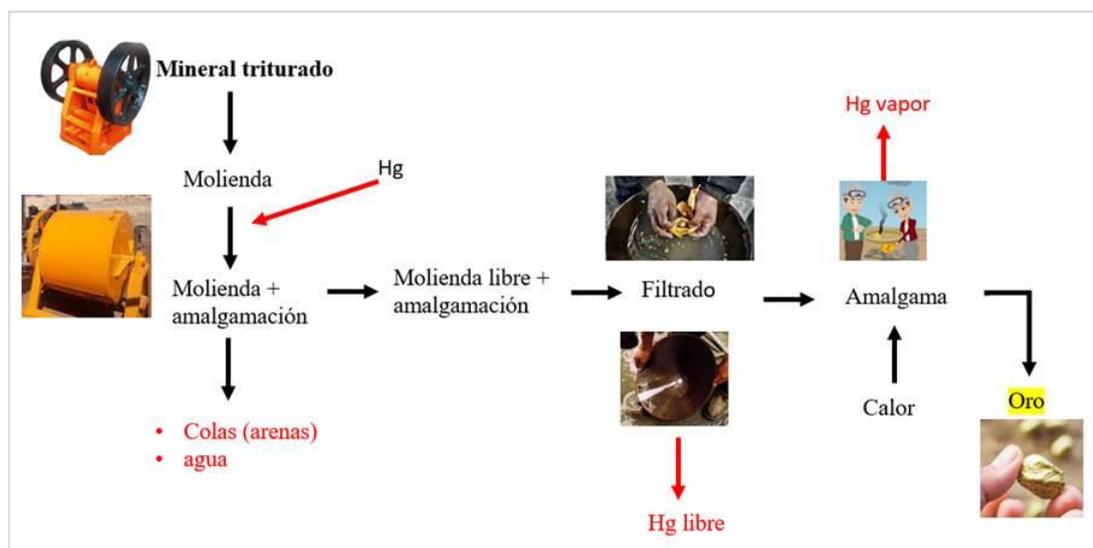


Figura 1. Proceso de recuperación de oro

Fuente: (Cuentas & Velarde, 2019)

### 1.1.4. Mercurio

El mercurio (Hg) es un componente químico con el número atómico 80, es un metal pesado que es conocido por ser líquido a temperatura ambiente, lo que lo hace único entre los elementos metálicos, en el estado físico a temperatura ambiente se encuentra a (25°C), el mercurio es un líquido plateado y brillante (Brousett *et al.*, 2021), su punto de congelación es muy bajo, aproximadamente -39°C, y su punto de ebullición es relativamente alto, alrededor de 356°C, sus compuestos son tóxicos para los humanos y la vida silvestre, la exposición prolongada o a altas concentraciones de mercurio

puede tener efectos dañinos en el sistema nervioso, los riñones y otros órganos (Sharma *et al.*, 2019).

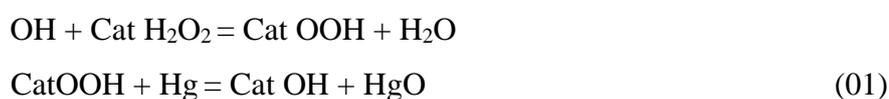
El uso del mercurio en la minería, particularmente en la extracción de oro y plata, ha sido una práctica común durante muchos años, especialmente en regiones donde se carece de tecnologías más avanzadas y seguras. Sin embargo, el uso de mercurio en la minería es altamente perjudicial para la salud humana y el medio ambiente, y muchas organizaciones y gobiernos están trabajando para eliminar o reducir drásticamente esta práctica (Espinoza, 2018). El método más común de uso de mercurio en la minería de oro es la amalgamación, consiste en mezclar mercurio con el mineral aurífero triturado para formar una amalgama de oro y mercurio, se calienta la amalgama para vaporizar el mercurio, dejando atrás el oro, este proceso es relativamente simple y económico, lo que lo ha convertido en una opción atractiva en áreas donde no se dispone de tecnologías modernas (Cuentas & Velarde, 2019). Además de las fuentes de emisión naturales, las actividades antropogénicas emiten enormes cantidades de Hg a la atmósfera (Nair *et al.*, 2022).

#### 1.1.5. Mercurio elemental

El mercurio es altamente tóxico para los seres humanos y otros organismos debido a la facilidad con la que se vaporiza y se inhala. La exposición prolongada al mercurio puede causar daños graves a la salud, especialmente al sistema nervioso (Vicente *et al.*, 2020).

A pesar de su toxicidad, el mercurio se ha utilizado en diversas aplicaciones a lo largo de la historia. Algunos de sus usos incluyen la fabricación de termómetros, barómetros, interruptores de inclinación, y en la amalgama dental. Sin embargo, muchos de estos usos se han reducido o eliminado debido a preocupaciones ambientales y de salud (Berzas *et al.*, 2009).

La liberación de mercurio en el medio ambiente, ya sea a través de la minería, la quema de carbón u otras actividades humanas, puede tener graves consecuencias para la salud de los ecosistemas acuáticos y la vida silvestre (Carrasco *et al.*, 2023).



### **1.1.6. Metilmercurio**

El metilmercurio es un compuesto químico altamente tóxico que contiene mercurio, se forma cuando el mercurio elemental, que es un metal pesado, se transforma en una forma orgánica llamada metilmercurio en el medio ambiente, esta conversión puede ocurrir de manera natural en ciertos entornos, pero también puede ser resultado de actividades humanas, como la quema de carbón y la minería de mercurio, es especialmente preocupante debido a su alta toxicidad y su capacidad para bioacumularse en la cadena alimentaria (Velásquez *et al.*, 2021).

Cuando el metilmercurio se libera al agua, los microorganismos pueden convertirlo en una forma aún más tóxica llamada metilmercurio, los peces y otros organismos acuáticos pueden acumular metilmercurio en sus tejidos a medida que se alimentan de otros organismos que contienen este compuesto (Chen *et al.*, 2022), la exposición crónica al metilmercurio puede causar daños graves al sistema nervioso, especialmente en el desarrollo fetal y en niños pequeños (Chaves, 2016). Los síntomas de envenenamiento por metilmercurio pueden incluir problemas de desarrollo cognitivo, daño cerebral, problemas motores y otros trastornos neurológicos.

### **1.1.7. Mercurio orgánico**

El mercurio orgánico se refiere a compuestos de mercurio que contienen enlaces químicos entre el mercurio y los átomos de carbono, estos compuestos son diferentes del mercurio elemental, que es un metal pesado en su forma elemental y no contiene enlaces con carbono, se forma cuando el mercurio elemental interactúa con compuestos orgánicos, generalmente en procesos naturales en el medio ambiente (Baragaño *et al.*, 2022). El fenilmercurio generalmente se utiliza en los productos comerciales entre otros productos denominados dimetilmercurio este elemento también se usa en cantidades menores como norma de referencia para pruebas químicas (Yevugah *et al.*, 2021).

### **1.1.8. Mercurio inorgánico**

El mercurio inorgánico es un compuesto de mercurio que no contienen enlaces químicos entre el mercurio y los átomos de carbono, a diferencia del mercurio orgánico, que incluye compuestos como el metilmercurio que contienen enlaces con carbono (Zhang *et al.*, 2020), el mercurio inorgánico consiste en compuestos en los que el

mercurio está en su forma elemental o está unido a otros elementos no carbonados, como oxígeno, cloro o azufre (Li *et al.*, 2015).

Algunos ejemplos de compuestos de mercurio inorgánico incluyen el (HgCl<sub>2</sub>), el óxido de mercurio (HgO) y (HgS), estos compuestos inorgánicos de mercurio pueden encontrarse en diversas aplicaciones industriales (Muñoz *et al.*, 2023), como la producción de productos químicos, la minería y la fabricación de dispositivos eléctricos y electrónicos, puede ser tóxico, pero por lo general es menos tóxico que el mercurio orgánico, como el metilmercurio (Waack *et al.*, 2023). La exposición crónica o aguda al mercurio inorgánico puede tener efectos perjudiciales para la salud humana, especialmente si se produce inhalación de vapores de mercurio en forma de mercurio elemental (Sharma *et al.*, 2019).

### 1.1.9. Usos del mercurio

El uso de mercurio en la minería ha sido históricamente común en ciertas operaciones de extracción de oro y plata, principalmente en la minería artesanal e informal, sin embargo, es importante destacar que el uso de mercurio en la minería está asociado con graves peligros para la salud y el medio ambiente (Mantey *et al.*, 2020), y su uso se encuentra en declive debido a las regulaciones y esfuerzos para promover prácticas más seguras y sostenibles. Mediante la amalgamación es un proceso en el que el mercurio se mezcla con el mineral triturado que contiene oro (Cuentas & Velarde, 2019), el mercurio se une químicamente con los metales preciosos, formando la amalgama, luego, se calienta para volatilizar el Hg dejando atrás el oro (Yevugah *et al.*, 2021).

Este método ha sido utilizado durante siglos en la minería de pequeña escala y artesanal, el mercurio se utiliza para concentrar minerales de oro y plata, se mezcla con el mineral triturado, y la amalgama resultante se separa de los otros materiales (Mantey *et al.*, 2020), lo que facilita la recuperación de los metales valiosos, se usa en el proceso de lixiviación de oro, donde ayuda a disolver el oro contenido en minerales triturados, el uso de mercurio en la minería ha sido objeto de creciente preocupación debido a sus impactos negativos en la salud y el medio ambiente (Mason *et al.*, 2019).



### **1.1.10. Mercurio en las plantas**

El mercurio es un metal pesado que puede afectar a las plantas y los ecosistemas vegetales en diversas formas (Zhang *et al.*, 2020), la presencia de mercurio en el suelo o en el agua puede tener efectos perjudiciales en la salud de las plantas y puede afectar la cadena alimentaria, las plantas pueden absorber mercurio a través de sus raíces desde el suelo o el agua en la que crecen, la cantidad de mercurio que una planta absorbe depende de varios factores, como la forma química del mercurio (Xun *et al.*, 2017), la concentración en el suelo o el agua y las características de la planta (Rodríguez, 2018).

### **1.1.11. Acumulación de mercurio en tejidos vegetales**

Algunas plantas poseen la capacidad de acopiar Hg en sus tejidos, estas plantas se denominan plantas acumuladoras de mercurio o plantas hiperacumuladoras de mercurio, la acumulación de mercurio en las plantas puede tener un impacto negativo en su crecimiento y desarrollo (Qian *et al.*, 2018), cuando las plantas absorben mercurio y acumulan este metal en sus tejidos, pueden convertirse en una fuente de exposición para otros organismos en la cadena alimentaria, los herbívoros que se alimentan de estas plantas pueden acumular mercurio en sus tejidos, y luego, los carnívoros que se alimentan de estos herbívoros también pueden verse afectados por la acumulación de mercurio (Baragaño *et al.*, 2022).

### **1.1.12. Efectos en la salud de las plantas**

La exhibición al Hg puede tener complicaciones negativas en las plantas, como la inhibición de la fotosíntesis, la reducción del crecimiento y la alteración de la absorción de nutrientes esenciales, estos efectos pueden perturbar a las plantas para sobrevivir y prosperar en su entorno (Carrasco *et al.*, 2023), es importante destacar que la presencia de mercurio en las plantas puede tener graves implicaciones para la salud humana y el medio ambiente, especialmente cuando se trata de plantas que son parte de la dieta de los seres humanos o que son consumidas por la fauna local (Leung *et al.*, 2013).

La bioacumulación de mercurio a lo largo de la cadena alimentaria puede llevar a niveles peligrosos de mercurio en los organismos superiores (Munive *et al.*, 2018). Por esta razón, la regulación y la gestión de la contaminación por mercurio son importantes para prevenir la exposición al mercurio y sus efectos adversos en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Muñoz *et al.*, 2023).

### 1.1.13. Impactos en la salud humana por mercurio

La exposición al Hg puede tener graves cambios en la salud humana, el Hg es un metal pesado tóxico que puede afectar varios sistemas del cuerpo, los efectos en la salud dependen de la forma en que una persona está expuesta (por ejemplo, a través de la inhalación (Sharma *et al.*, 2019), la ingestión o el contacto cutáneo) y de la duración y la cantidad de exposición, pueden ocurrir como daño al sistema nervioso, tiene una afinidad por el sistema nervioso central y puede causar daño neurológico en exposiciones crónicas o agudas (Goyzueta & Trigos, 2009), esto puede llevar a síntomas como temblores, debilidad muscular, problemas de coordinación, dificultades en el habla y deterioro cognitivo, afecta a los riñones, especialmente en forma de metilmercurio (una forma orgánica del mercurio que se encuentra en algunos tipos de pescado) (Llop *et al.*, 2013), los riñones pueden dañarse y perder su capacidad para eliminar las toxinas del cuerpo, puede aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares al afectar el sistema vascular y aumentar la presión arterial (Dermott *et al.*, 2012).

Las mujeres embarazadas que están expuestas al mercurio pueden transmitirlo al feto a través de la placenta, puede causar daño cerebral, retrasos en el desarrollo y problemas neurológicos en el feto en desarrollo (Zhang *et al.*, 2023), a su vez, ocasiona problemas gastrointestinales, la ingestión de mercurio puede causar irritación gastrointestinal, dolor abdominal, diarrea y otros problemas digestivos, la exposición dérmica al mercurio puede causar irritación de la piel, dermatitis y, en algunos casos, reacciones alérgicas (Tong *et al.*, 2021), la inhalación de vapores de mercurio puede irritar los pulmones y causar problemas pulmonares, tos y dolor en el pecho, la exposición crónica al mercurio también se ha asociado con cambios en el estado de ánimo, la ansiedad, así como con dificultades de comportamiento en niños (Lee *et al.*, 2023), es importante destacar que la toxicidad del mercurio varía según su forma química. El mercurio metálico es menos tóxico que el mercurio inorgánico, y el metilmercurio, que se encuentra en ciertos tipos de pescado, es particularmente peligroso (Ottenbros *et al.*, 2019).

### 1.1.14. Mercurio en sedimento

Cuando el mercurio (Hg) se libera en el entorno acuático, tiende a depositarse en la capa superior de los sedimentos (Chen *et al.*, 2022). En estos sedimentos, el mercurio

puede formar compuestos complejos, gracias a la acción de microorganismos, puede convertirse en metilmercurio. El mercurio tiene la capacidad de moverse considerablemente, pudiendo desplazarse a distancias que van desde 100 hasta 180 kilómetros desde la fuente de emisión (Ferro, 2015).

En cuanto al suelo, el Hg es consumido por las especies y llega a los frutos y semillas que son consumidos por animales herbívoros (Carrasco *et al.*, 2023). En el agua, el mercurio es transformado en metilmercurio por bacterias presentes en los sedimentos, y este compuesto se acumula a lo largo de la cadena alimentaria, consiguiendo acumulaciones elevadas en organismos, principalmente peces, que se encuentran en niveles superiores de la cadena alimentaria (Gutiérrez *et al.*, 2020). Esto puede representar un riesgo para la salud humana cuando se consumen pescados contaminados con metilmercurio o plantas cultivadas en suelos contaminados (Tong *et al.*, 2021).

El mercurio presente en la atmósfera puede ingresar al entorno terrestre y acuático a través de procesos de deposición tanto en forma seca como húmeda, tal como lo han investigado (Ali *et al.*, 2016). Estudios previos han demostrado que el Hg es uno de los metales de origen humano que se encuentran en los sedimentos, no solo como resultado de la deposición atmosférica y la liberación de aguas residuales, sino también como una fuente de metilmercurio (Hasimuna *et al.*, 2021). La toxicidad y la movilidad del mercurio en los sedimentos están influenciadas en gran medida por sus formas químicas específicas y su interacción con las partículas sedimentarias (Fernandez *et al.*, 2022).

#### **1.1.15. Bioacumulación de mercurio en plantas**

Es un proceso en el cual el mercurio presente en el suelo o el agua es absorbido por las raíces de las plantas y se acumula en sus tejidos a lo largo del tiempo. Este fenómeno puede tener efectos negativos tanto en las plantas como en los organismos que consumen esas plantas, incluidos los seres humanos (Subramanian *et al.*, 2022), este fenómeno se produce mediante la absorción por las raíces, el mercurio presente en el suelo o el agua puede estar en forma de iones metálicos o metilmercurio (Rodríguez, 2018), mediante las raíces se absorbe estos compuestos, el mercurio es absorbido por las raíces junto con el agua y otros nutrientes esenciales para el crecimiento de la planta, una vez que el mercurio es impregnado por las raíces, puede ser transportado a través del sistema vascular de la planta

(el xilema) y acumularse en diferentes partes de la planta, la acumulación puede ocurrir en la raíz, tallo, hoja y las flores o los frutos, dependiendo del tipo de planta y del nivel de contaminación del mercurio en el entorno (Zhu *et al.*, 2020).

Si las plantas contaminadas con mercurio son consumidas por herbívoros, el mercurio puede transferirse a través de la cadena alimentaria, esto se conoce como biomagnificación y puede resultar en niveles peligrosamente altos de mercurio en los depredadores de la parte superior de la cadena alimentaria, la exposición crónica a mercurio a través de la alimentación de plantas contaminadas o de animales que se han alimentado de esas plantas puede causar problemas de salud, como daño neurológico, daño renal y otros efectos negativos (Álvarez, 2019).

### 1.1.16. Fitorremediación

Es la técnica de recuperación de suelos contaminados con metales pesados para ello se utilizan las especies de plantas y microorganismos mediante su sistema radicular para reducir acumulaciones de metales pesados en los suelos o en los ecosistemas naturales (Vigil, 2017), se observa la representación esquemática en la (figura 2).

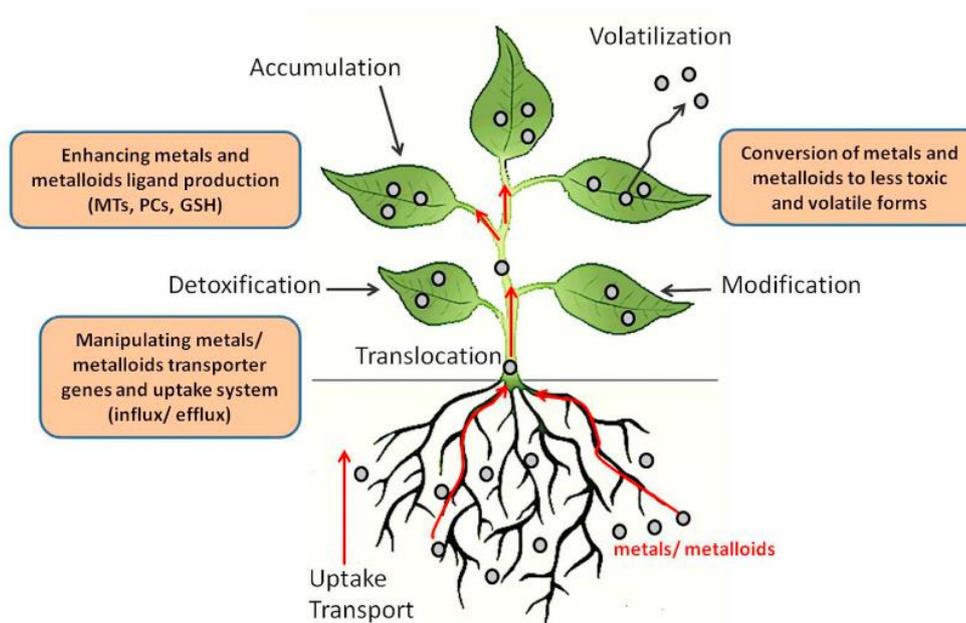


Figura 2. Representación esquemática de biotecnológicos

Fuente: (Bhat *et al.*, 2022)

### **1.1.17. Fitoestabilización**

La fitoinmovilización puede minimizar la movilidad y biodisponibilidad de los metales presentes en los suelos, esto evita a que siga su curso a las aguas subterráneas, también su acceso a la cadena alimenticia. Eso a su vez controla la acumulación de esos metales en la biota y reduce la lixiviación o filtración a estratos por debajo de la superficie del suelo (Vishnupradeep *et al.*, 2022), la Fito estabilización en algunos casos no da solución a la permanencia de los metales pesados, por lo que en la actualidad se utiliza para inactivar algunos contaminantes tóxicos presentes en el suelo (Vigil, 2017).

### **1.1.18. Fitodegradación**

La fitodegradación es la técnica que se usa en la degradación de los orgánicos presentes en los suelos por medio de enzimas que se encuentran en las raíces (Nebeská *et al.*, 2021), las plantas acumulan compuestos orgánicos y expulsan en especies no tóxicas (Griboff, 2018), esta técnica está limitada a la remediación de suelos contaminados por compuestos orgánicos y no es aplicable para metales pesados debido a su no biodegradabilidad (Kagalkar *et al.*, 2011).

### **1.1.19. Fitovolatilización**

La fitovolatilización es la captura de contaminantes del suelo por las plantas, esta técnica se emplea para contaminantes orgánicos como el mercurio y el selenio, este proceso es cuando la planta absorbe metales pesados por las raíces y luego es liberado en forma de vapor al medio ambiente (Zhang *et al.*, 2020).

### **1.1.20. Fitoextracción**

Es la capacidad de algunas especies de plantas que absorben metales del suelo con contenido de metales pesados y es trasladado a través de su sistema de transpiración que inicia de raíces hasta llegar a todo su entorno de la especie (Rosas, 2008). Estos metales podrían ser cadmio, plomo, arsénico, mercurio y otros (Makarova *et al.*, 2021).

Existe algunas características que debe cumplir las especies de plantas para que pudieran ser capaces e extraer metales pesados del suelo (Wang *et al.*, 2018) esto podría ser:

- Alta obtención en biomasa, esencialmente de las partes exteriores o frutos (Falcon, 2017).
- Método fundamental extenso
- Concentración de metales pesados en los tejidos
- Tolerancia a elevadas cifras de metales
- Veracidad de transmitir metales desde las cepas a las partes aéreas (Fajardo *et al.*, 2020).
- Resistente a plagas y enfermedades

#### 1.1.21. Factor de bioconcentración

Es la eficacia de una especie que concentra metales en sus tejidos que emanan del suelo presente en su espacio radicular, se estima con la siguiente ecuación (Orozco *et al.*, 2022).

$$BCF = \frac{C_{tejidos}}{C_{suelo}} \quad (03)$$

Donde:

$C_{tejidos}$  = Acumulación del metal en los enramados cosechables de la planta (Brutti *et al.*, 2018).

$C_{suelo}$  = Acumulación del mismo metal en el suelo.

#### 1.1.22. Factor de translocación

Es la eficacia que cuenta una especie para translocar los metales pesados a partir de su acumulación en las raíces que posterior a ello se traslada a sus demás partes aéreas (ver figura 3), se puede estimar mediante la siguiente ecuación (Subramanian *et al.*, 2022).

$$BCF = \frac{C_{aéreas}}{C_{raíces}} \quad (04)$$

$C_{aéreas}$  = concentración del metal en las partes aéreas de la especie (Brutti *et al.*, 2018).

$C_{raíces}$  = concentración del metal en las raíces.

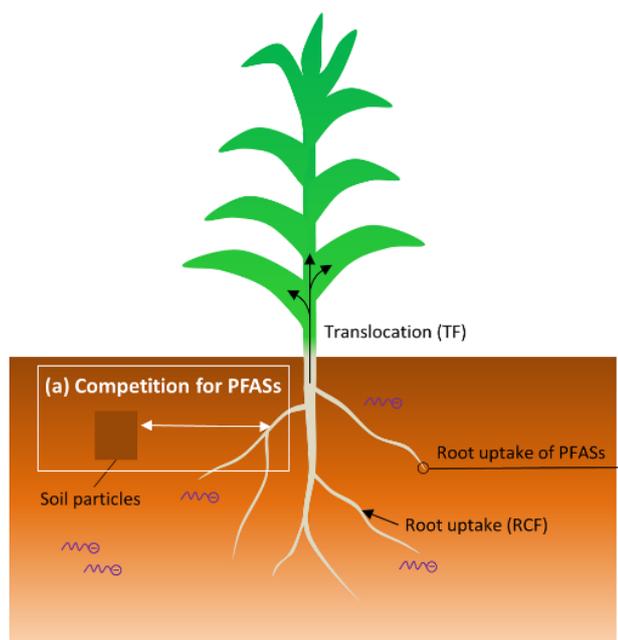


Figura 3. Absorción y acumulación de PFAS por plantas

Fuente: (Mei *et al.*, 2021)

### 1.1.23. Factores climáticos en la producción de biomasa

Las condiciones de clima en donde se ubica la especie de planta tiene un rol directo para producir su biomasa de manera directa en las concentraciones de metales (Vigil, 2017), el autor midió el desarrollo de *Salix viminalis* en 3 meses en contextos similares del suelo. Por un lado, para el lugar de Les Abattes el desarrollo de su especie fue menor debido a sus temperaturas que manifestaron en su entorno y sus precipitaciones fueron superiores (Speranza *et al.*, 2020).

### 1.1.24. Absorción y concentración de metales por las plantas

los metales pesados pasan a través de los espacios celulares, una vez llegan a la endodermis se encuentran con la banda asturiana que hace que esa ruta no pueda seguir funcionando y por tanto estos contenidos de nutrientes y agua necesariamente deben pasar a través del citoplasma de la célula, en la ruta sin plástica, el movimiento tanto de iones de los nutrientes esenciales como el agua se da a través del citoplasma del aceite entonces se pasa la epidermis la corteza se llegará en 2 Hermes y pasa hacia los accesos vasculares que es un movimiento que implica el traspaso a través de las membranas secundarias todas las células poseen una membrana exterior que es la membrana citoplasmática en esta membrana citoplasmática que está constituida como

no sabemos por bicapa de fosfolípidos. La membrana tiene comportamiento hidrofílico en el exterior y en el interior no obstante en la parte central debido a la parte líquida de esos fosfolípidos de ambiente netamente hidrofóbico. Los cationes positivos, así como ( $\text{Ca}^{2+}$ ), ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ( $\text{K}^+$ ) entre otros, mediante la composición iónica, la presencia de algunos cationes positivos en el suelo influye en la concentración de metales pesados en las especies de plantas, tiene que ver la composición química del suelo y la capacidad de intercambio iónico, cuando el suelo contine acumulación iónica retiene más cationes positivos, esto involucra en la disponibilidad de los metales pesados hacia las especies de plantas, puede modificar la forma de algunos complejos de metales, el pH del suelo influye en la y trasferencia de elementos a través de sus tejidos de la raíz.

#### 1.1.25. Toxicidad de los contaminantes

El suelo que se presenta en condiciones de acumulación de metales pesados podrían tener varios metales pesados que ocasionarían problemas para las especies de plantas (Mei *et al.*, 2021), esto afecta a la capacidad de éstas para extraer el metal mercurio. Por lo tanto, todos los metales, estarían en concentraciones elevadas por lo que no solo limitan su desarrollo de la especie, si no que comprometerían su viabilidad para desarrollarse la especie (Vigil, 2017).

#### 1.1.26. Modelo phyto DSS

Este modelo se apoya en principios de absorción de metales pesados de los suelos y son movilizados a través de su mecanismo de transpiración (Vigil, 2017), por lo que se estarían establecidos por (M) que una especie adquiere o se proporciona por medio de su transpiración (T) para un periodo de tiempo (t)

$$M\alpha \int_0^t T dt \quad (05)$$

$$\Delta[M]_z = \frac{1}{\rho_E} \int_0^t R_z T C \phi dt \quad (06)$$

Donde:

- $\Delta(M)_z$  = descenso de contenido de metal en el suelo a cierta hondura z en mg/kg (Vigil, 2017).
- $\rho_z$  = densidad del suelo ( $\text{g/cm}^2$ ) a la hondura z.
- t tiempo en días.

- Rz = fracción de densidad radicular (Peña & Eddie, 2017).
- T = consumo de agua (L/día).
- C = concentración de metal licuado en el suelo (mg/L).
- $\Phi$  = factor de absorción radicular (Vigil, 2017).

### 1.1.27. Diferencia entre tipos de suelo

Son elementos edáficos que se ven pH, proporción de carbono, relación de arcilla, medio de nutrientes, nivel freático y grado de compactación (Falcon, 2017), según el sistema USDA asentado en la textura (ver figura 4). La clasificación de su granulometría se aprecia en la tabla 1 (Brutti *et al.*, 2018).

Tabla 1

*Categorización de tamaños del suelo*

Partícula	Dimensión
Arcillas	<0,002 mm
Limos	0,002-0,06 mm
Arenas	>0,06 mm

Fuente: (Vigil, 2017)

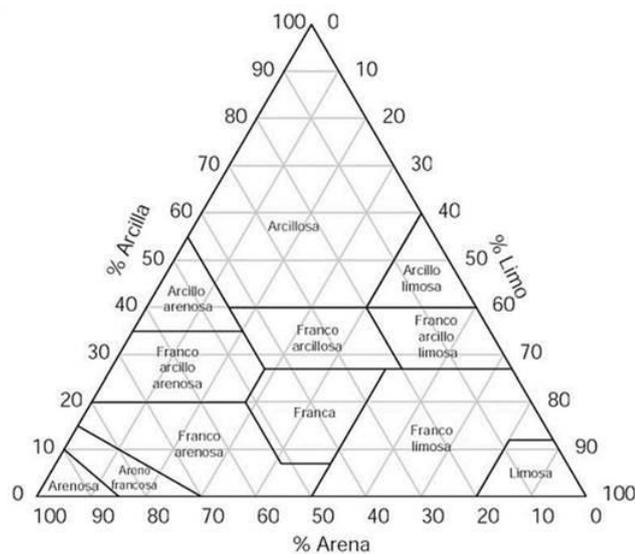


Figura 4. Triángulo USDA

Fuente: (Vigil, 2017)

### 1.1.28. Estándar de calidad ambiental

Es un régimen que instaure las concentraciones de los elementos o también los parámetros presentes ya sea en el suelo, agua y aire, en condición de su incorporación receptor que esto no representa cierto tipo de peligro para la salud humana ni mucho menos al medio ambiente. Según los parámetros que uno quiera referirse (ver tabla 2), las concentraciones o niveles es expresada en máximos y mínimos o se puede decir rangos de valores (MINAM, 2014).

Tabla 2

*Estándares de calidad ambiental para suelos*

Parámetros en mg/kg PS	Suelo Agrícola	Suelo Residual Parques	Suelo Comercial/Industrial/Extractivo	Método de ensayo	
Orgánicos					
Arsénico	50	50	140	EPA EPA 3051	3050
Cadmio	1,4	10	22	EPA EPA 3051	3050
Cromo total	..	400	1 000	EPA EPA 3051	3050
Mercurio	6,6	0,6	24	EPA EPA 6020 o 200.8	7471

Fuente: (MINAM, 2014)

### 1.1.29. Diversidades acumuladoras de metales pesados

Existen varias especies de plantas, cultivos comestibles (Luo *et al.*, 2017), hierbas y pastos y que son conocidas como hiperacumuladoras de metales tóxicos, estos pueden absorber y soportar altas concentraciones de elementos pesados tanto en las hojas y tallos (Griboff, 2018), por su parte los autores afirman 20 especies que son capaces de concentrar mercurio y en la familia *Buxaceae*, *Euphorbiaceae*, estos acumularon 5% de su peso seco (Rodríguez, 2018).

### 1.1.30. Mecanismos de resistencia a metales

Las especies desarrollan mecanismos de respuestas (ver figura 5), esto permite impregnar compuestos (Cesare *et al.*, 2016), son;

- a) Inmovilidad por pectinas, evitando el contacto con el protoplasma (Marrugo *et al.*, 2020).

- b) Limitando la permeación de la pared celular.
- c) Por la formación de quelatos en el citoplasma (Rodríguez, 2018).
- d) Fraccionar en partes no sensitivas así como las vacuolas, (Hedrich *et al.*, 2018).

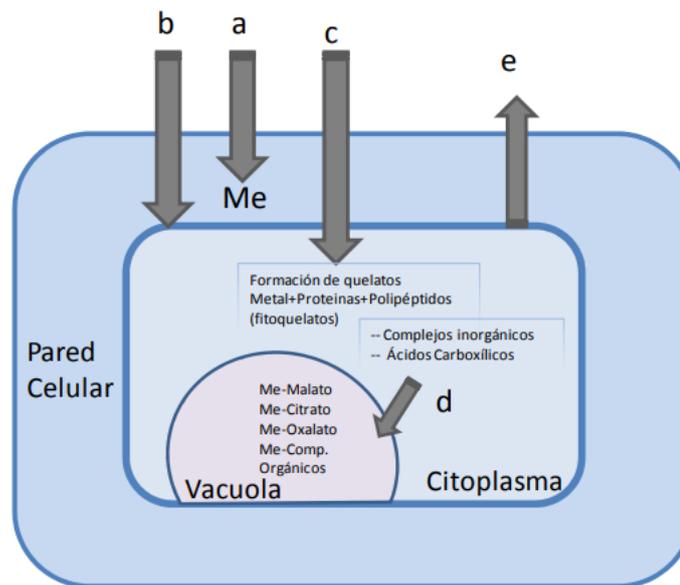


Figura 5. Mecanismos resistencia a metales pesados mediante plantas  
Fuente: (Sierra *et al.*, 2018)

### 1.1.31. (*Bellucia pentámera* N.)

Especie exótica conquistadora se propagó desde México a América tropical, y ahora está invadiendo algunas áreas en Indonesia, alcanza entre 2 y 12 m de altura. Es originalmente nativo de los trópicos del nuevo mundo (Solfiyeni *et al.*, 2022), tiene el tronco cubierto por corteza de color café, sus hojas lisas, ovaladas, perfumadas continuas por frutos amarillentos, comestibles, carnosos, con un sabor dulce pero un poco ácidos (ver figura 6). Tiene una gran extensión de México hasta Amazonas Perú y el Brasil, pero rara vez se encuentra allí. En el clima tropical la cultura es sin problemas (Dillis *et al.*, 2018).



*Figura 6.* (Bellucia pentámera N.)

Fuente: (Solfiyeni *et al.*, 2022)

### 1.1.32. (*Kniphofia pauciflora* B.)

Es perteneciente a la subfamilia Asphodeloideae. Las plantas tienen estolones cortos, formando grupos de tallos cortos. Las hojas de 20-35 cm son suaves y de color amarillo verdoso. Las hojas miden de 2 a 8 mm de ancho y tienen una sección transversal triangular (ver figura 7). La espiga floral mide entre 30 y 50 cm de largo y se eleva por encima de las hojas (Alister & Van Staden, 1996). Esta especie está amenazada debido a la urbanización no se encuentra en la localidad tipo (Lindsey *et al.*, 1998).



*Figura 7.* (*Kniphofia pauciflora* B.)

Fuente: (Lindsey *et al.*, 1998)

### 1.1.33. (*Weinmannia sp. L.*)

Esta especie crece en bosques de montaña entre 1000 a 3600 m.s.n.m., es abundante y diverso en bosques nublados de la ceja de selva, entre 2300 a 3000 m.s.n.m., especialmente en bordes de las serranías. El suso que se la da a esta especie solo es para la medicina tradicional, para leña, carpintería, elaboración de utensilios, construcciones, sobre todo son importantes por la alta calidad de su leña, especialmente en ambientes altoandino (Fuentes, 2014).

Se caracteriza por su aspecto arbóreo de corteza lisa y grisácea, así como ramas sinuosas con hojas imparipinnadas verdes y ligeramente pubescentes (ver figura 8). Las flores de 4-5 sépalos y pétalos blanquecinos se agrupan en una espiga terminal, siendo su fruto una cápsula leñosa con diminutas semillas pardas (Fajardo *et al.*, 2020). Planta arbórea de tallo muy ramificado, corteza lisa y tonos grisáceos, con un diámetro promedio de 70 cm y una altura de 2 a 4 m. El dosel poco tupido en forma de copa es de color verde brillante durante el crecimiento vegetativo y pardo-rojizo durante la fructificación (Fernández, 2019). Las hojas miden 2-8 cm de largo, las hojas imparipinnadas están compuestas por 5-8 pares de folíolos con uno terminal, sésiles, asimétricas, de 1 cm de largo y pubescentes (Morales, 2010).

Los márgenes de cada folíolo son revolutos o curvados hacia abajo, ligeramente dentados, con la base oblicua y el ápice redondeado. El limbo foliar es verde oscuro, con pubescencias de tono pardo-dorado (Fuentes, 2014).



Figura 8. (*Weinmannia sp. L.*)

Fuente: (Miranda & Fuentes, 2015)

## 1.2. Antecedentes

Zunaidi *et al.* (2023) establecieron un estudio de campo para determinar el potencial de fitoextracción de seis especies vegetales, *Amaranthus viridis* y otros, utilizaron el método de digestión ácida USEPA 3050B, los extractos se analizaron en busca de Cr, Cu, Fe, Mn, utilizando ICP-OES. Los resultados demostraron, *B. rapa* L. acumuló el mayor nivel de Cd (0,4 mg/kg) y Pb (5,71 mg/kg), mientras que *B. alba* L. acumuló el mayor nivel de Cr (2,62 mg/kg) en todas las partes de la planta, Co, Cu, Fe, Mn y Zn se acumularon mayoritariamente en hojas de *A. viridis* L. (Co, Cu, Fe, Mn y Zn), *B. alba* L. (Co, Fe y Mn), *B. chinensis* (Mn y Zn) y *O. tenuiflorum* L. (Mn), y raíces de *C. frutescens* L. (Co, Cu, Fe y Mn), *B. alba* L. (Co, Cu y Zn), *A. viridis* L. y *B. chinensis* (Cu y Fe) y *B. rapa* L. (Fe). Cr, Pb y Ni fueron significativamente mayores en raíces de *B. alba* L. (Cr) y *B. rapa* L. (Ni y Pb). Se observó MTF >1 en las raíces de todas las especies para Co, Cd, Zn y Ni. En conclusión, las especies mostraron que los metales pesados se dividían de manera diferente entre varias partes de las plantas de las especies vegetales y pueden explicarse por los dos primeros componentes (PC1 y PC2) que estaban asociados con las partes de la raíz y/o las hojas de la mayoría de las especies vegetales.

Bortoloti & Baron (2022) los investigadores indican que, la fitorremediación por el género botánico *Brassica* surge como una técnica importante, donde hacen el uso de especies para descontaminar estas zonas. El objetivo fue dilucidar el uso potencial fisiológico y bioquímico de diferentes especies pertenecientes al género *Brassica* para biorremediar y tolerar los efectos nocivos de estos contaminantes ambientales sobre su metabolismo. Estas especies también tienen procesos fisiológicos que ayudan a la absorción, translocación y acumulación de HM tóxicos en orgánulos celulares de baja actividad, además de un mecanismo de defensa enzimático y no enzimático eficiente que atenúa el daño oxidativo inducido por la producción de reactivos. variedades de oxígeno (ROS). Además, eficientes y económicamente viables.

Kurniawan *et al.* (2022) su proyecto propone el uso de fitorremediación asistida por bioaumentación en suelos contaminados, así como los mecanismos de eliminación e interacciones entre plantas y microbios, también realizaron en detalle. La fitorremediación asistida por bioaumentación muestra una mayor eficiencia y realiza una eliminación completa de metales del suelo en comparación con solo la bioaumentación. La investigación relacionada con la selección de especies hiperacumuladoras, las especies

microbianas potenciales, el análisis de los mecanismos de interacción y el uso potencial del tratamiento de la biomasa vegetal después del tratamiento se sugieren como direcciones de investigación futuras para mejorar este tema propuesto actualmente.

Alves *et al.* (2022) mencionan que, la contaminación del suelo con metales es una preocupación importante; sin embargo, la fitorremediación asistida por microbios ha impulsado significativo debido a su carácter respetuoso con el medio ambiente, los mecanismos empleados por los microbios para incentivar el desarrollo de especies y ayudar a la exclusión o inmovilización de metales en suelo, mejorando así fitoextracción y la fitoestabilización, respectivamente. Por último, proporcionamos una perspectiva sobre las direcciones futuras de la fitorremediación y la fitominería asistidas por microbios. Claramente, para validar y comprender completamente el potencial de la fitorremediación asistida por PGPB.

Baragaño *et al.* (2022) los investigadores indican que, las plantas fueron precultivadas y transferidas a macetas. Se monitorearon As y Hg en el sistema suelo-planta y se midieron parámetros concernientes con el estrés oxidativo, pigmentos fotosintéticos y compuestos tiólicos no proteicos (NPT). En general, la aplicación de nZVI inmovilizó As en el suelo y aumentó la acumulación de Hg en la planta, aunque sorprendentemente disminuyó el estrés oxidativo. Las plantas en suelo tratado con nZVI también mostraron un aumento en el contenido de NPT en las raíces. En cambio, la aplicación del fertilizante movilizó As, mejorando así los factores de bioacumulación. La observación revela las enmiendas simultáneas son un enfoque prometedor para la estabilización del suelo y el fitomanejo de suelos contaminados con As/Hg.

Dinh *et al.* (2022) para los investigadores, la fitominería de metales ofrece una posibilidad prometedora de extracción de metales en sitios donde las actividades mineras tradicionales. La revisión presentada en este artículo vincula tres áreas científicas como elementos esenciales para formar la cadena fitominera de NM. La provisión de NM en los vegetales es el primer paso, denominado proceso de fitoextracción. A esto le sigue el aumento de la concentración de NM a través de la etapa de enriquecimiento. Eventualmente, aunque menos entendidos, se discuten los métodos de extracción de NM de restos sólidos de biomasa, así como de diversas fuentes secundarias, particularmente cenizas de incineración, que ayudan a visualizar las vías potenciales en la fitominería.

Kahangwa *et al.* (2021) según los investigadores, evaluaron las variables de fitorremediación de especies de plantas selectas cerca de áreas mineras, recogieron y evaluaron el crecimiento sobre todo sus raíces con la finalidad de identificar concentraciones de metales pesados como Pb, Cr, Cd, Cu, As, Mn, Ni, mediante el equipo espectrofotómetro de (AAS) y espectrofotometría. Obtuvieron resultados fisicoquímicos del suelo con textura franca y ligeramente ácidos (pH 6,1–6,5), el Carbono orgánico y el elemento orgánico eran bajos entre (0,6–2,0 %), el elemento N total era muy bajo (<0,10 %), el fósforo estaba entre (6-12 mg kg<sup>-1</sup>) en concentraciones altas oscilaba entre (13-25 mg kg<sup>-1</sup>).

Liu & Tran (2021) mencionan que para la eliminación razonable de biomasa vegetal que contiene metales pesados (HM) es un problema difícil para la tecnología de fitorremediación. El proceso de operación y los parámetros técnicos de cada método de eliminación son diferentes. Los HM pueden migrar y transformarse en diferentes procesos de eliminación. Algunos métodos de eliminación y utilización pueden generar algunos subproductos. El objetivo fue suministrar referencias para aquellos parámetros técnicos y las características de varios métodos de eliminación y utilización, a fin de elegir y utilizar el método apropiado para el tratamiento de la biomasa vegetal que contiene MP después de la fitorremediación.

Pietrini *et al.* (2021) el propósito de los autores fue, desarrollar una estrategia de fitoextracción capaz de eliminar de manera eficiente el Pb del suelo de un depósito de combustible fuera de servicio ubicado en Italia mediante el uso combinado de EDTA y bacterias endófitas aisladas de plantas autóctonas. Se aislaron y seleccionaron un total de 12 cepas endófitas de tres especies nativas (*Lotus corniculatus*, *Sonchus tenerrimus*, *Bromus sterilis*) para preparar un consorcio microbiano utilizado para inocular microcosmos de *Brassica juncea* y *Helianthus annuus*. En cuanto a *B. juncea*, los datos experimentales mostraron que el tratamiento con inóculo microbiano solo fue el más efectivo para mejorar la fitoextracción de Pb en los brotes (hasta 25 veces más que el control). Estos resultados, también validados por el análisis metagenómico, confirman que la interacción planta-microbio es un punto clave crucial en la fitorremediación.

Velásquez *et al.* (2021) en su trabajo de investigación su objetivo fue determinar los niveles de Hg en suelos de minas de oro aluviales solas y bosques intactos en la región de Madre de Dios, obtuvieron concentraciones de mercurio en muestras de suelos que

superaban los ECA, donde para suelos agrícolas, canadienses y británicos eran entre (6,6 mg/kg). Los niveles de Hg en MMM y HMM no fueron significativamente diferentes entre las dos áreas en estudio. En conclusión, los niveles más altos de Hg se hallaron en bosques maduros vírgenes que bordean los residuos de la mina, pero también hubo una tendencia a aumentar las concentraciones de Hg con la regeneración de la vegetación.

Marrugo *et al.* (2020) realizaron un estudio para identificar plantas naturales que ascienden en suelos contaminados con Hg utilizados con fines agrícolas y para evaluar su potencial como sistemas de fitorremediación. Veinticuatro especies de plantas nativas fueron identificadas y analizadas para Hg total (THg) en otros tejidos y suelos subyacentes. Las acumulaciones de THg en el suelo estuvieron entre 230 y 6320 ng g<sup>-1</sup>. Los rangos de TF modificaron de 0,33 a 1,73, con valores altos en los suelos menos contaminados con Hg. No se encontró correlación entre los suelos con bajas concentraciones de Hg y las hojas de las plantas, lo que indica que TF no es un indicador muy preciso, a pesar de su baja producción de biomasa, varias hierbas y subarbustos son adecuados para la aplicación de fitorremediación, debido a su rápido crecimiento y altos valores de AF en partes de plantas grandes y fáciles de cosechar.

Mello *et al.* (2020) para los investigadores, la cuantificación, eficiencia y posibles mecanismos de fitorremediación del mercurio por bacterias endófitas son mal entendidos. Las especies y *Pseudomonas sp.* BacI38 incrementó la sublimación de Hg 47,16% y 62,42%, respectivamente. A excepción de *Bacillus sp.* BacI34 y *Pantoea sp.* BacI23, las otras seis cepas bacterianas favorecían el mercurio bioacumulación en tejidos vegetales. La fitorremediación asistida por bacterias endófitas contribuyó a reducir la toxicidad del sustrato evaluada en diferentes organismos modelo. Las cepas bacterianas endófitas seleccionadas aquí son candidatos viables para la fitorremediación asistida que ayudarán a reducir la toxicidad ambiental de los suelos descompuestos con mercurio.

Stylianou *et al.* (2020) los investigadores en su estudio tuvieron como objetivo describir y comparar los parámetros ambientales en tres de estas minas, existen algunas plantas que crecen naturalmente. Por lo tanto, el uso potencial de plantas nativas como diferentes especies que podría aplicarse para la fitorremediación de las minas de sulfuros en Chipre. Estas plantas parecen tener una gran fuerza a valores bajos de pH y alto contenido de metales en ambientes contaminados. suelos y agua. En conclusión, se potenciará la acción de las plantas autóctonas y así trabajar hacia un tratamiento de fitorremediación exitoso,

que resulte en la minimización de futuros contaminantes generados por los botaderos de residuos sólidos.

Liu *et al.* (2020) los autores mencionan que el Hg y sus combinados son uno de los contaminantes más peligrosos. La fitorremediación es una alternativa por su bajo costo, esto a su vez insíto, es beneficioso por el tema económico. Este método es superior a 1,0 para algunas plantas, el factor de bioacumulación superior a 1,0 en *Axonopus compressus*. Algunas plantas transgénicas pueden acumular más Hg que las plantas no transgénicas, algunos microorganismos de la rizosfera podrían aumentar la inestabilidad del Hg.

Ramirez (2019) en su trabajo de investigación menciona que las especies son capaces de entablar una comunicación entre ellas, sobre todo con la raíz de cada especie, así como la regulación hormonal, la obtención de nutrientes, la inducción de la respuesta sistémica y la producción de compuestos antifúngicos. La metodología que utilizo mediante el parámetro de la síntesis fue lograda usando Quant exprés, haciendo uso del STG2. Los resultados obtenidos de su trabajo indica que, las plantas *Prosopis laevigata* crecen en suelos que tienen metales tóxicos, lo cual se encontró en los puntos de muestreo ya sea en suelos, así como en diferentes tejidos del árbol.

Qian *et al.* (2018) el mercurio total (THg) y el metilmercurio (MMHg) se investigaron en 259 plantas silvestres pertenecientes a 49 especies en 29 familias que crecían en terrenos baldíos altamente contaminados con Hg compuestos por relaves de minas de Wanshan. Se evaluaron los factores de bioconcentración (FBC) de THg y MMHg del suelo a las raíces, suelo, entre todas las especies investigadas, tenían concentraciones significativamente elevadas de THg en brotes y/o raíces que alcanzaron los 100 mg/g, teniendo en cuenta su dominancia y la tolerancia identificada en el presente estudio, se sugiere que *E. ciliaris* es un candidato práctico para la fitoextracción, mientras que *A. hispidus* sirve para fitoestabilización de suelos descompuestos en minería de Hg.

Mahajan & Kaushal (2018) para ellos los elementos venenosos en el suelo y el agua. Una nueva tecnología impulsada por energía solar basada en plantas, la fitorremediación, surge como un enfoque ecológico y rentable para eliminar metales pesados de varios medios con la ayuda de especies de plantas hiperacumuladoras. Este documento de revisión tiene como objetivo, proporcionar información sobre la fitorremediación y sus mecanismos para la eliminación de metales pesados, cumple con varios estudios de casos de campo que son significativo en la comprensión de la exclusión de Cd por varias

plantas. Además, señala varias fuentes y los efectos de Cd y otras tecnologías utilizadas para la remediación de Cd. Este artículo proporciona el desarrollo reciente en los mecanismos de hiperacumulación de Cd por diferentes plantas, con el fin de motivar futuras investigaciones en este campo.

Munive *et al.* (2018) para descontaminar el suelo, se les ocurrió hacer un trabajo en el valle del Mantaro y sembraron maíz para extraer metales pesados donde encontraron Pb y cadmio Cd estos superan los (ECA). Como resultado obtuvieron gran cantidad de Pb y Cd, en donde las consecuencias negativas dieron menor rendimiento en materia seca hojas, tallos y raíces, y un crecimiento lento confirmando así su idea que el maíz es un buen acumulador de estos metales, a su vez las correcciones orgánicas ayudan a solubilizar el Pb y Cd del suelo.

Ojuederie & Babalola (2017) indican que la contaminación ambiental, ha afectado negativamente al ecosistema natural, la biorremediación es una alternativa para descontaminar suelos que contienen metales pesados mediante su mecanismo biológico de los microorganismos y las plantas para controlar los metales peligrosos, destacó la importancia de las metodologías y direcciones biotecnológicas modernos para mejorar la capacidad de las enzimas microbianas para degradar metales pesados de manera efectiva a un ritmo más rápido, destacando los avances recientes en la biorremediación microbiana y la fitorremediación para la eliminación de metales pesados del medio ambiente. Sin embargo, se debe seguir estrictamente las normas de bioseguridad en el uso de métodos biotecnológicos para garantizar la seguridad del medio ambiente.

Marrugo *et al.* (2016) en su trabajo de investigación identificaron la especie *Jatropha curcas* para valorar su empatía en la fitorremediación en suelos contaminados por diferentes niveles de mercurio. Los tratamientos experimentales consistieron en cuatro niveles de concentración de Hg en el suelo: T0, T1, T5 y T10 (0, 1, 5 y 10 lg Hg por g de suelo, respectivamente). Determinó el contenido total de mercurio absorbido por los diferentes tejidos vegetales (raíces, tallos y hojas) durante cuatro meses de exposición. Establecieron los factores de comportamiento de crecimiento, acumulación de mercurio. Los valores de FBC oscilaron entre 0,21 y 1,43. Los suelos con T1 mostraron significativamente mayor FBC (1,43) seguidos de T10 (1,32) y T5 (0,91), todos ellos al cuarto mes.



Olivares *et al.* (2013) para los autores su objetivo fue investigar el potencial para el uso de *Ricinus communis* L. (planta de aceite de ricino) para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, realizó el ensayo en relaves mineros que contienen Cu, Zn, Mn, Pb y Cd. Verificó la caracterización fisicoquímica, metales totales, extraíbles con DTPA y solubles en agua en muestras de pilas de relaves rizosféricos. Esta planta colonizadora primaria es muy adecuada para hacer frente a las condiciones tóxicas y puede ser útil para la estabilización de estos residuos, en conclusión, pueden dar un nuevo valor a áreas adecuadas contaminadas por metales producto de la minería.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Identificación del problema

El ecosistema del bosque tropical es altamente diverso y complejo y aún no se comprende completamente el impacto de diversas perturbaciones en su interior. Mientras tanto, las amenazas que enfrenta siguen aumentando con el tiempo (Negrazis *et al.*, 2022). Estas amenazas incluyen la deforestación y la contaminación por mercurio causada por la minería ilegal. En este último caso, los desechos mineros se vierten directamente en cursos de agua, lo que provoca graves problemas ambientales con consecuencias para el entorno, la economía y la sociedad, además de representar un riesgo para la salud humana. La capacidad del mercurio para persistir en la atmósfera y viajar distancias considerablemente largas ha llevado a la contaminación de áreas alejadas de su fuente original (Marrugo *et al.*, 2020).

En la minería artesanal se utiliza mercurio para extraer el oro de los minerales, este elemento puede convertirse en metilmercurio, una forma altamente tóxica que se bioacumula en las especies de plantas, peces y otros organismos acuáticos, lo que también representa un riesgo para la salud humana y la vida silvestre. Este mercurio a menudo se vierte directamente en el suelo o se mezcla con los minerales, lo que puede llevar a una acumulación en el suelo circundante. Las plantas tienen la capacidad de absorber metales pesados como el mercurio de su entorno través de sus raíces y pueden acumularlo en sus tejidos, esto puede dar como resultado niveles cada vez más altos de mercurio a medida que la planta crece y se desarrolla.

La composición química del suelo desempeña un papel fundamental, ya que determina la disponibilidad de mercurio para las plantas. Además, las condiciones climáticas locales, así como la topografía, la granulometría del suelo y el curso de agua pueden influir en la absorción y acumulación de mercurio ya que elementos como la temperatura y el relente pueden afectar la movilidad de este metal pesado en el suelo. La presencia de otras sustancias en el entorno, como compuestos orgánicos o minerales, también puede interactuar con el mercurio y modular su absorción por parte de las plantas.

La acumulación de mercurio en plantas también puede afectar a la fauna que se alimenta de estas plantas o que interactúa con el ecosistema contaminado. Los depredadores que se alimentan de animales que han estado expuestos al mercurio pueden verse afectados por la biomagnificación, donde los niveles de mercurio se acumulan a medida que avanzan en la cadena alimentaria (Baragaño *et al.*, 2022), además de la contaminación del suelo.

La falta de investigación sobre la acumulación de mercurio en diversas especies de plantas en la quebrada San Blas es una brecha significativa en nuestro entendimiento de los ciclos biogeoquímicos y sus impactos en los ecosistemas. Determinar cómo diferentes plantas interactúan con el mercurio y cómo este metal se acumula en sus tejidos tiene diversas implicaciones tanto a nivel científico como práctico.

Identificar plantas con una mayor capacidad de acumulación de mercurio, conocidas como "acumuladoras de metales pesados", es esencial para comprender la variabilidad intraespecífica y desarrollar estrategias de gestión ambiental. Estas plantas podrían utilizarse en programas de fitorremediación, donde se emplean plantas para reducir la concentración de contaminantes en el suelo. Sin embargo, es decisivo evaluar los posibles efectos secundarios de este proceso, como la transferencia de mercurio a través de la cadena alimentaria.

## 2.2. Enunciados del problema

### 2.2.1. Problema general

¿Cuál fue la capacidad de concentración de mercurio en las tres especies (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía?

### 2.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Bellucia Pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía?
- ¿Qué capacidad de concentración de mercurio existe en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía?
- ¿Cuál es la cantidad de concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía?

## 2.3. Justificación

Ante los problemas ambientales que se presenta a nivel mundial a causa de la minería informal, la falta de control y el desinterés por el estado peruano en lugares alejados, así como en la quebrada San Blas de la provincia de Sandía, en donde existe una diversidad y variedad de plantas silvestres, que son contaminados directamente por la minería informal. La recuperación aurífera en estas operaciones se realiza mediante amalgamación del mercurio que se mezcla el mineral de molienda, esto provoca que el mercurio se filtre al suelo y mediante el agua es transportado en el trascurso del riachuelo, contaminando al entorno y afectando a la salud de las personas que residen en las partes bajas (Pablo Bamba y el distrito de Yanahuaya).

Por esta razón, surge un interés particular en determinar la capacidad de concentración de mercurio en las tres especies botánicas identificadas como (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*). El propósito de este análisis radica en establecer la magnitud de la presencia de mercurio en dichas plantas, con el fin de adoptar medidas preventivas que posibiliten de manera natural la contención de la propagación de este elemento contaminante en los compartimientos del suelo, agua y aire.

Este enfoque busca no solo comprender el nivel de acumulación de mercurio en las especies vegetales mencionadas, sino también identificar el potencial de estas plantas para actuar como agentes de fitorremediación. La aplicación de estas especies en procesos de fitorremediación podría representar una estrategia eficaz para contrarrestar la expansión del mercurio, mitigando los efectos adversos en el suelo, agua y aire. Este enfoque preventivo, fundado en la capacidad natural de ciertas plantas para absorber y retener contaminantes, ofrece una perspectiva innovadora y respetuosa con el medio ambiente para abordar la incierta de la contaminación por mercurio.

Dada la ausencia de estudios exhaustivos, este trabajo busca llenar el vacío existente al enfocarse en los procesos microbiológicos que desencadenan la degradación de contaminantes en el suelo. Estos procesos, que involucran la transformación de compuestos químicos nocivos en sustancias inocuas o menos tóxicas, representan un área crítica en la gestión ambiental. Con esta investigación brindo información valiosa sobre las capacidades biodegradativas naturales presentes en el suelo, con la finalidad de avanzar hacia estrategias más efectivas de remediación ambiental.

Por otra parte, este trabajo es de gran aporte a la investigación científica, con la cual se genera nuevos conocimientos para el tratamiento de relaves mineros mediante las plantas naturales que existe en la zona, debido a su capacidad de fitoextracción de mercurio presente en los relaves.

El trabajo tiene una utilidad metodológica, para métodos compatibles mediante un análisis a través de espectrofotómetro de expresión atómica por plasma microondas 4210 MP-AES y analizador de mercurio, para el plasma por ensayo de digestión multiácida ICP-AES este trabajo es factible pues se dispone de los recursos necesarios para llevarla a cabo.

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

Determinar la capacidad de concentración de mercurio de tres especies (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

#### 2.4.2. Objetivos específicos

- Establecer la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Bellucia pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.
- Precisar la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.
- Detectar la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.

#### 2.5. Hipótesis

##### 2.5.1. Hipótesis general

La cantidad de mercurio de tres especies (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*) acumulan en diferentes proporciones en la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.

##### 2.5.2. Hipótesis específicas

- Existe el efecto de la capacidad de concentración de mercurio en la (*Bellucia pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.
- Prevalece una mayor capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.
- Preexiste la mayor capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de estudio

##### 3.1.1. Ubicación del proyecto

La zona de estudio está en la región de selva alta al sur del país, específicamente en el distrito de Yanahuaya, provincia de Sandia, departamento de Puno. Su altitud es de 3,400 m.s.n.m. y sus coordenadas se registran en el sistema UTM, Zona 19 Sur, bajo el sistema WGS-84 (ver tabla 3). Los puntos de muestreo se pueden identificar en el área mencionada (figura 9).

Tabla 3

*Coordenadas UTM de la zona de estudio*

N°	Metros al Este	Metros al Norte	Cota (m.s.n.m.)
1	485 627	8 402 627	3 400
2	485 438	8 402 806	3 260
3	485 352	8 403 006	3 010

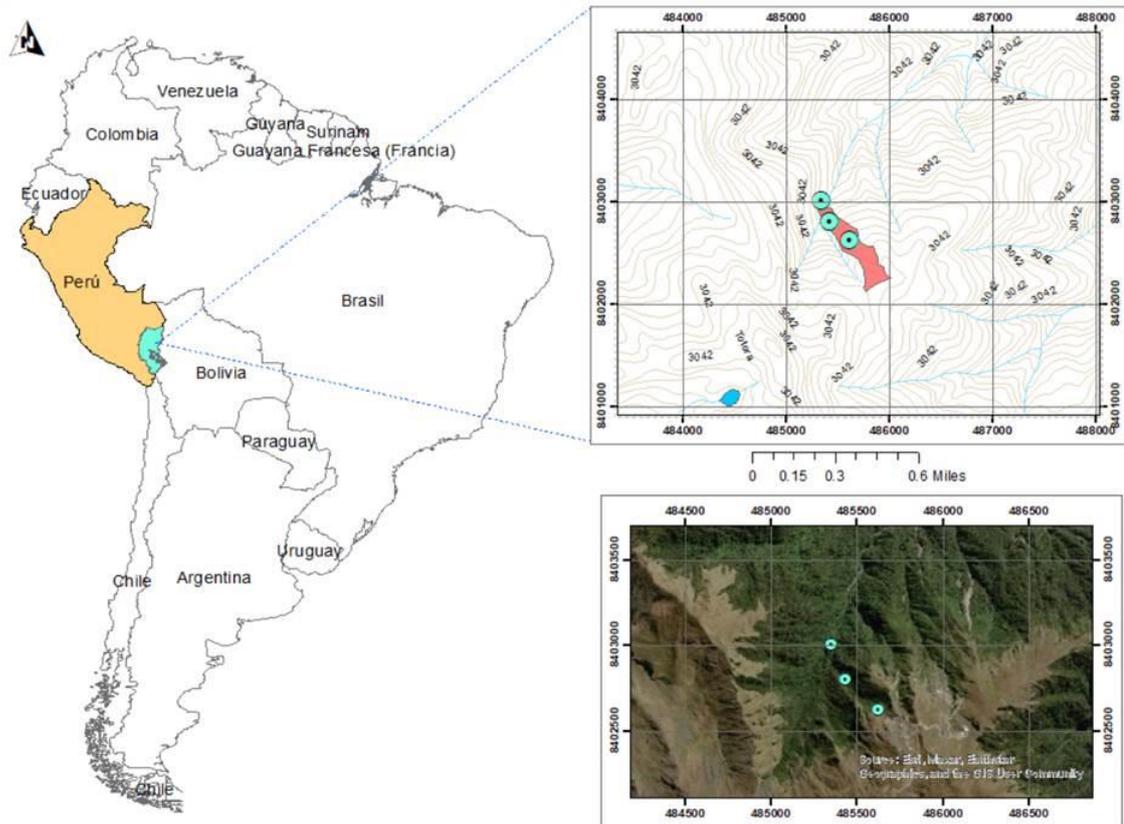


Figura 9. Mapa de sitio de investigación

Fuente: (Google, s.f.)

### 3.1.2. Accesibilidad

Para llegar al lugar de estudio desde la ciudad de Puno, es fundamental seguir las indicaciones detalladas en la tabla 4. Esta tabla proporciona las vías, distancia, tiempo y tipo de carreteras específicas para garantizar un desplazamiento eficiente y seguro hasta el destino deseado.

Tabla 4

*Acceso al lugar*

Vía	(km)	Duración	Tipo
Puno - Juliaca	45	1:00	Asfaltada
Juliaca – Huancané	63	1:00	Asfaltada
Huancané - Perlas	70	1:30	Asfaltada
Perlas - Yanahuaya	80	3:00	Afirmada
Yanahuaya – San Blas	25	6:00	Camino de herradura
<b>Total</b>	<b>235</b>	<b>12:30 hrs.</b>	<b>-</b>

### 3.1.3. Clima

En el ámbito de estudio de este trabajo, la cantidad de nubes en el cielo varía considerablemente a lo largo del año. El período más despejado comienza alrededor del 9 de mayo y se extiende durante unos cuatro meses, finalizando aproximadamente el 21 de septiembre, en el mes de julio es más despejado, con un promedio del 56 % de tiempo con cielo completamente despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado.

Por otro lado, la época más nublada del año empieza cerca del 21 de septiembre y dura alrededor de 5 a 6 meses, concluyendo aproximadamente el 9 de mayo. Enero es el mes más nublado, con un promedio del 92% de tiempo con cielo nublado o mayormente nublado en la zona de San Blas (SENAMHI, 2022).

### 3.1.4. Geología local

Según las investigaciones realizadas en la zona, se han identificado depósitos de cuarzoarenita. Estos depósitos están compuestos principalmente por partículas clásticas, siendo la mayoría de estos granos de forma redondeada a subredondeada, con una selección que varía entre alta y baja esfericidad. Los componentes principales de estos granos incluyen sílice monocristalina, feldespatos, minerales opacos y zircón. También se encuentran gravas líticas de origen metamórfico en menor cantidad. La mayoría de estos granos presentan contactos de tipo cóncavo-convexo, sin mostrar evidencia significativa de deformación, aunque en algunos casos se pueden observar bordes suturados y extinción ondulante. La moscovita muestra ligeras flexiones en su estructura (Jaimes & Trelles, 2021).

La matriz es menos abundante y está compuesta por adheridos microfibrosos de sericita, cloritas y materia orgánica, que llenan los espacios entre los granos. En algunas áreas, esta matriz se organiza en expoliaciones. Además, hay granos que están cementados por cuarzo sintaxial, arcillas y materia orgánica. De manera ocasional, se pueden identificar finas vetas de limonitas en ciertas partes del depósito (Jaimes & Trelles, 2021).

### 3.1.5. Estratigrafía

Las estratificaciones geológicas en los cuadrángulos de Sandia 29y, San Ignacio 29z4 abarcan una amplia variedad de unidades que datan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, tal como se ilustra en la figura 10. El Paleozoico comprende la Formación Iparo (del Ordovícico temprano), seguida por la Formación Purumpata (del Ordovícico medio), la Formación Sandia (del Ordovícico tardío) y la Formación Ananea (del Silúrico-Devónico). El Cenozoico se compone de la Formación Titán (del Neógeno-Plioceno), así como depósitos morrénicos y aluviales del Cuaternario (Jaimes & Trelles, 2021).

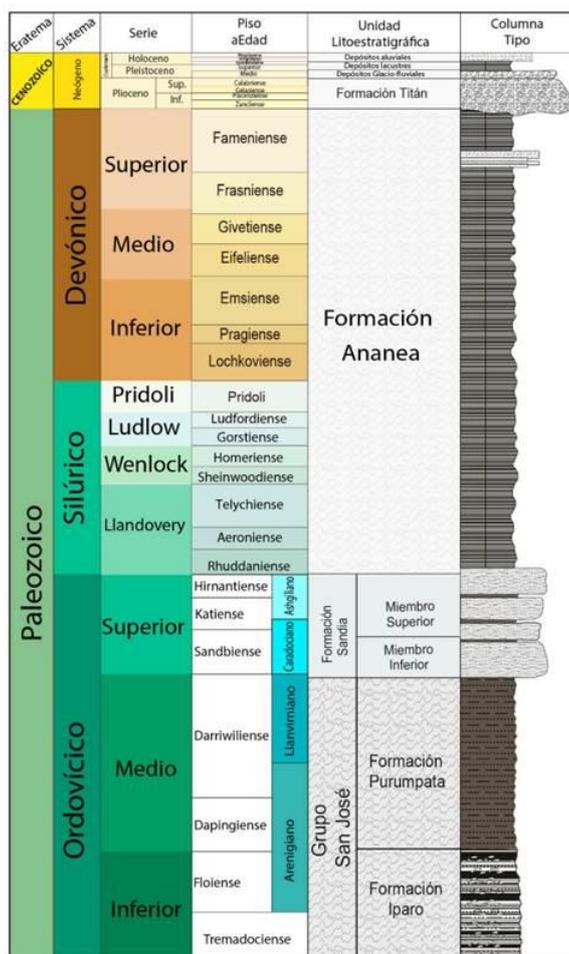


Figura 10. Columna estratigráfica de Sandia (29y) y San Ignacio (29z)

Fuente: (Jaimes & Trelles, 2021)

### 3.2. Población

Está representada por la microcuenca de la Provincia de Sandia del distrito de Yanahuaya que abarca desde la parte Nor Este hasta la zona Sur Oeste que cubre un área de 16,80 hectáreas de la quebrada San Blas (figura 11).

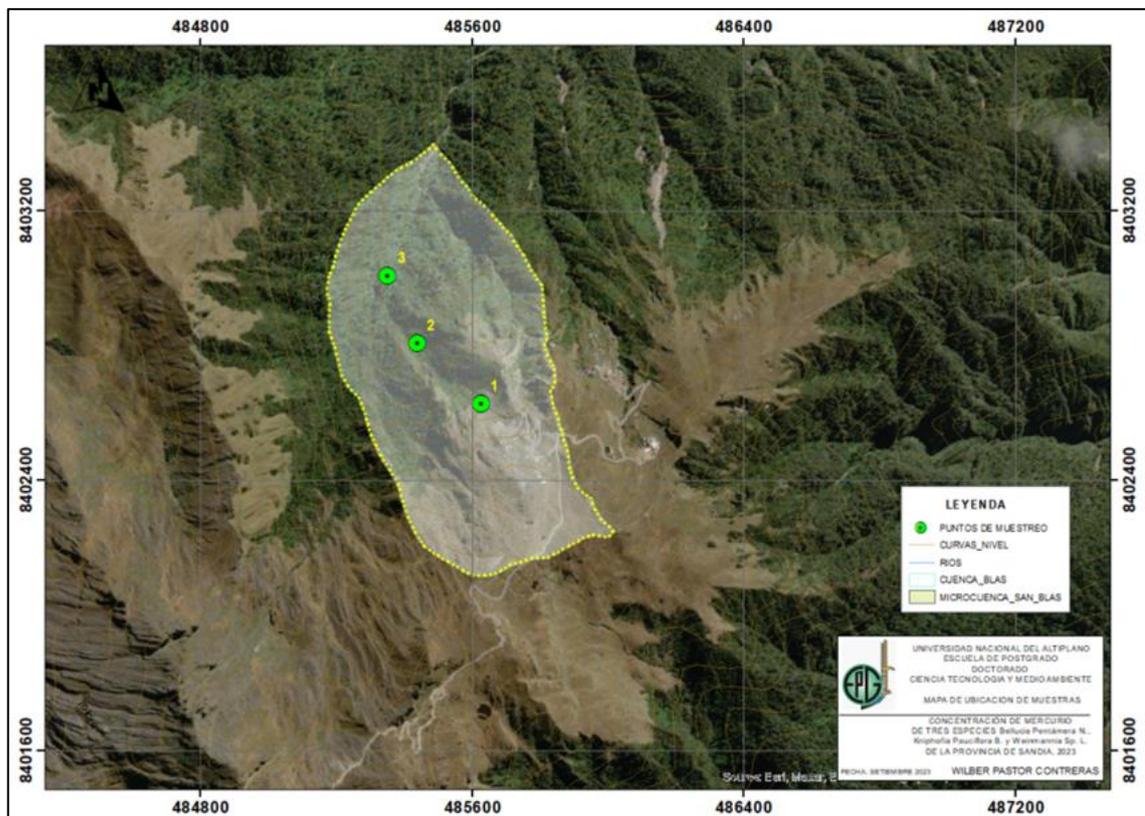


Figura 11. Micro cuenca San Blas

Fuente: (Google, s.f.)

### 3.3. Muestra

El muestreo se llevó a cabo en tres puntos dentro del contexto geográfico de la microcuenca San Blas. Se seleccionó tres especies vegetales en cada ubicación, específicamente (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*). Posteriormente, se procedió a analizar la concentración de mercurio en cada uno de los siguientes componentes de estas especies; suelo, raíces, tallos y hojas. Se recolectaron y analizaron 36 muestras para evaluar la presencia de mercurio en la microcuenca San Blas.

### 3.4. Método de investigación

La metodología empleada en esta investigación se caracterizó por ser descriptiva, transversal, aplicativa pero no experimental. Se siguió un enfoque organizado y sistemático, basado en etapas como se describe en el estudio de (Ñaupas *et al.*, 2014).

El método de investigación se llevó a cabo mediante un estudio de campo y la recopilación de datos. Se evaluó el impacto en las especies vegetales y el suelo presentes en el área de estudio utilizando la Guía de Evaluación de Riesgo Ambiental propuesta por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2010). Además, se aplicaron las pautas establecidas en el Decreto Supremo N° 002-2013-(MINAM, 2014) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el suelo, con base en la metodología utilizada para estimar el nivel de riesgo en pasivos ambientales en el subsector de hidrocarburos, según lo indicado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016).

### 3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### 3.5.1. Establecer la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Bellucia pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia

Se inició el proceso mediante la fase de planificación en el entorno de trabajo en el gabinete, donde se llevó a cabo la recopilación de información bibliográfica y documental sobre la ubicación en cuestión. Esto se logró mediante la creación de mapas base, el análisis de estadísticas de población y la descripción detallada de las características físicas de la zona, incluyendo información sobre el clima, la meteorología, las precipitaciones y las temperaturas. Además, se recopilaron datos relacionados con las actividades y las características generales del área de estudio, como se mencionó en un estudio previo realizado por (Falcon, 2017) y otros investigadores.

En la siguiente etapa que involucra trabajo de campo, se llevó a cabo una preparación adecuada antes de realizar visitas a la zona de estudio. Durante estas visitas, se realizaron investigaciones exhaustivas con el fin de evaluar los posibles riesgos presentes en el área. Se confirmaron los ambientes y se recopilaron datos necesarios para llevar a cabo una evaluación completa, así como mencionan los investigadores (Zárate *et al.*, 2021). Cabe enfatizar que esta metodología tuvo en cuenta tanto los aspectos humanitarios relacionados con la población local, en particular los mineros

que residen en la zona, como los aspectos ambientales que conciernen al medio ambiente. En este último caso, se consideraron cuatro componentes clave: suelo, raíz, tallo y hoja de cada especie vegetal, los cuales determinaron los puntos de muestreo debido a su relevancia en el contexto de la contaminación del sitio. Finalmente, en el proceso de inspección y recolección de datos en campo, se utilizó una tabla de registro denominado cadena de custodia y reporte de datos así como estable la normativa del (MINAM, 2014).

- **Procedimiento metodológico**

La técnica utilizada para calcular la cantidad de mercurio en las especies involucró un proceso dividido en cinco fases, tal como:

- a) Recolección de datos en campo
- b) Caracterización de las especies
- c) Monitoreo realizado en campo
- d) Ensayos en laboratorio
- e) Análisis estadístico

- a) **Recolección de datos de campo**

- **Extracción de muestras para la identificación de especie**

En la microcuenca de San Blas se han establecido tres puntos de muestreo. En esta ubicación, se procedió a la recolección de la primera especie de manera cuidadosa, evitando causar daños a su estructura. La recolección se llevó a cabo desde la raíz hasta las hojas, seguida de un proceso de etiquetado y embolsado. Consecutivamente, los especímenes fueron trasladadas al laboratorio de taxonomía con el fin de identificar el nombre de la especie ver tabla 5.

- **Método fitosociológico**

Fue desarrollado por Braun-Blanquet y se utiliza principalmente para evaluar la predominancia de variedades a través de la cobertura vegetal. la ventaja de esta técnica es su capacidad para caracterizar y clasificar rápidamente la vegetación (Mostacedo & Fredericksen, 2004). Sin embargo, tiene la desventaja de depender en gran medida de la subjetividad en la obtención de información así como de la necesidad de conocer

todas las especies presentes en las áreas de muestreo, ya que el tamaño del área de muestreo está relacionado con el área mínima requerida (Ferro, 2015).

El primer paso implicó identificar el área que fue homogéneas en términos de vegetación, se realizó un inventario de las especies presentes en esas áreas, se les asignó las categorías de cobertura esto incluyen: r = uno o pocos individuos; + = menos del 5% de cobertura; 1 = abundante, pero con cobertura muy baja, siempre inferior al 5%; 2 = muy abundante y con menos del 5% de cobertura o menos abundante, pero con cobertura entre 5% y 25%; 3 = cobertura entre 25% y 50%, independientemente del número de individuos; 4 = cobertura entre 50% y 75%, independientemente del número de individuos; y 5 = cobertura entre 75% y 100%, independientemente del número de individuos.

Para realizar esta agrupación de las especies, se consideró criterios geomorfológicos, edáficos y climáticos. Finalmente, se asignó un nombre a cada grupo, conocido como "asociación", siguiendo la nomenclatura fitosociológica.

Tabla 5

*Ficha para la recolección de muestras de (Bellucia pentámera N.)*

N° Muestreo		01	02	03
Lugar		-	-	-
Fecha		-	-	-
Área		-	-	-
Coordenadas	Este	-	-	-
	Norte	-	-	-
Elevación		-	-	-
Alineación		-	-	-
Diferido		-	-	-
Cobertura vegetal		-	-	-
Especies		-	-	-

## b) Caracterización de las especies

La identificación de especies de plantas es un proceso complejo que requiere conocimientos botánicos y herramientas adecuadas, el primer paso fue observar

cuidadosamente la planta en cuestión, se examinaron sus características físicas, como hojas, flores, frutos, tallo y raíces, algunos detalles, como el color, la forma, el tamaño y la textura. Mediante las guías de campo botánicas son libros o recursos en línea que proporcionan información sobre especies de plantas y sus características distintivas, mediante las fotografías y descripciones que ayudaron a los especialistas a comparar las características de la planta que están observando con las de las especies conocidas (ver tabla 6).

Las muestras recolectadas en el área de estudio han sido trasladadas al laboratorio de Taxonomía de la Escuela Profesional de Ciencias Agrarias de la UNA-Puno para ser analizadas e identificadas correctamente.

Los resultados del laboratorio fueron: el espécimen botánico puesto a disposición pertenece a la especie (*Bellucia pentámera*) “coronillo” según el método de categorización filogenético de Adolph Engler posee la siguiente posición Taxonómica.

Tabla 6

*Clasificación filogenético de Adolph Engler (Bellucia pentámera N.)*

Reino	Vegetal
Sub reino	Phanerogamae
División	Angiospermae
Clase	Dicocotyledoneae
Sub clase	Archychlamydeae
Orden	Myrtales
Familia	Melastomataceae
Genero	Bellucia
<b>Especie</b>	<b>(<i>Bellucia pentámera N.</i>)</b>

### c) Monitoreo realizado en campo

En la zona de estudio, se ha identificado la especie (*Bellucia pentámera N.*) Luego, se procedió a determinar su ubicación exacta utilizando un dispositivo GPS para obtener las coordenadas correspondientes (ver tabla 7). Además, se realizaron recolecciones de muestras de suelo en áreas donde la planta obtiene nutrientes que crecen en proximidad a los residuos mineros. También se efectuó la cogida de la raíz, el tallo y las hojas de

esta especie. A continuación, todas estas muestras fueron cuidadosamente empaquetadas y etiquetadas con información detallada, incluyendo el tipo de muestra, las coordenadas geográficas, la fecha y hora de recolección, la persona responsable y el tipo de análisis que se llevará a cabo (MINAM, 2014), para el monitoreo se consideró algunos aspecto que se describe en la tabla 8.

Tabla 7

*Coordenadas UTM de los puntos de muestreos de (Bellucia pentámera N.)*

Punto de muestreo	Metros al Este	Metros al Norte	Cota (m.s.n.m.)
1	485 627	8 402 627	3 400
2	485 438	8 402 806	3 260
3	485 352	8 403 006	3 010

### **Materiales**

- Cooler grandes y pequeños,
- Botellas de plásticos y vidrios,
- Baldes de plásticos transparente de primer uso y limpios,
- Guantes de vinilo, nitrilo
- Mascarillas,
- Tijeras esterilizadas
- Agua destilada
- Pinzas
- Alcohol 70°

### **Equipos**

- Equipo de posicionamiento GPS 600WE/1194
- Liofilizador
- Microbalanza Analítica Metler Toledo/MS205DU
- Estufa de Secado MMM/ VC55
- Cocina eléctrica
- Destilador de Agua Water Still/ 2001/2
- Analizador de mercurio directo

- Espectrofotómetro de Emisión Atómica Marca: AGILENT  
TECHNOLOGIES/Modelo: 4210/Serie: MY20339003

Tabla 8

*Particularidades a considerar en el monitoreo de especie (Bellucia pentámera N.)*

<b>Monitoreo de especie</b>	
Medio de transporte	Vehículo para transporte terrestre (camioneta)
Medios y reactivo	Agua destilada, preservantes, soluciones estándar
Conformaciones	Etiquetas, fichas de datos de campo, cadena de custodia y hojas de verificación, certificados entre otros.
Permisos	Los que sean necesarios.
Material cartográfico	Mapa hidrográfico, topográficos
Vestimenta de protección	Calzados de seguridad, botas de jebe largas.
Otros	Plumones indelebles, lápices, cinta adhesiva, papel secante, cinta

Fuente: (MINAM, 2017)

#### **d) Ensayos en laboratorio.**

##### **- Selección de especie vegetal para analizar**

La primera etapa en el proceso consiste en elegir las plantas, lo cual se llevó a cabo para determinar la cantidad de metales pesados presentes en el material vegetal. Esto se realiza siguiendo el esquema de operaciones que se muestra en la figura 12, que describe la secuencia de pasos realizados durante la fase experimental.

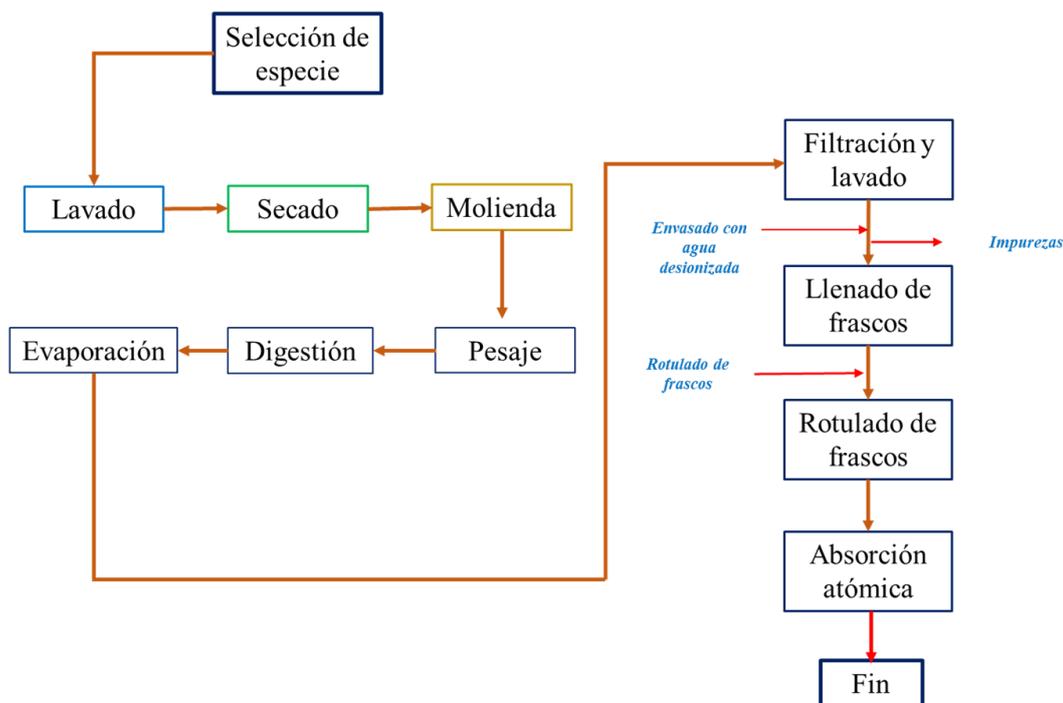


Figura 12. Diagrama de flujo de análisis en laboratorio

Fuente: (Falcon, 2017)

Respecto a la especie, este proceso tuvo como características de las familias de las especies hiper acumuladoras de metales pesados, se tuvo en cuenta la distribución en el entorno geográfico, así para suministrar una cantidad suficiente de muestras para luego realizar el proceso de digestión mediante la vía húmeda.

## - Equipos y materiales utilizados en laboratorio

### 1. Liofilizador

Una vez que las especies han llegado al laboratorio, se han sometido a un proceso de deshidratación en el liofilizador, este método implica la eliminación del agua de materiales, productos farmacéuticos, muestras biológicas u otros productos sensibles al calor a través de la congelación y la sublimación del agua congelada. En otras palabras, el agua se convierte claramente de etapa sólido a vapor sin pasar por la fase líquida. Este procedimiento permite conservar eficazmente el material y sus propiedades, alargando así su vida útil.

### 2. Balanza analítica

Se empleó una balanza semimicroanalítica de la marca METTLER TOLEDO, con el modelo LUXER DISCOVERY, que tiene una precisión de 0,01 miligramos (mg),

como se aprecia en el anexo. Esta balanza se utilizó para medir el peso de las muestras de materia vegetal previamente trituradas.

### 3. Reactivos

#### - Agua desionizada

Se empleó agua desionizada con una conductividad eléctrica de  $1,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ , dado que la presencia de emerges en el agua podría tener un efecto negativo en los resultados. Este tipo de agua se obtiene al someter agua de grifo a resinas con carga eléctrica, las cuales se unen a los iones minerales o sales disueltas en el agua, como el calcio, hierro, cobre, sodio, sedante, cloruro y los excluyen.

#### - Ácido nítrico (65,8 %; $\rho = 1,395 \text{ g}/\text{cm}^3$ )

El ácido nítrico condensado caliente es un poderoso oxidante que tiene la capacidad de disolver todos los metales comunes. Se utiliza ampliamente tanto por sí solo como en combinación con otros ácidos y agentes oxidantes, como el peróxido de hidrógeno. Esto se hace con el propósito de descomponer muestras de materia orgánica, lo que permite posteriormente la determinación del contenido de metales pesados en dichas muestras.

#### - Ácido perclórico (70 %; $\rho = 1,668 \text{ g}/\text{cm}^3$ )

El ácido perclórico concentrado a alta temperatura es un agente oxidante extremadamente poderoso. Es importante manejar con precaución este reactivo debido a su potencial peligro explosivo, el ácido concentrado a baja temperatura no presenta riesgo de explosión, al igual que las soluciones diluidas que están calientes; sin embargo, pueden ocurrir explosiones violentas cuando el ácido perclórico concentrado y caliente entra en contacto con materiales orgánicos o sustancias inorgánicas fácilmente oxidables.

La desintegración de sustancias utilizando este ácido requiere que se realice junto con otro ácido, comúnmente el ácido nítrico concentrado en una cantidad excesiva, con una proporción típica de 3 a 5 partes de ácido nítrico por cada ácido perclórico, con el fin de disminuir su capacidad de reacción, el proceso de digestión de muestra se realizó en la cabina extractora de gases.

#### 4. Verificación de calibración de DMA – 80

Antes de comenzar el proceso de evaluación de la calibración del equipo DMA-80 Direct Mercury Analyzer, se realiza la calibración del mismo mediante la medición de cantidades crecientes de mercurio en un rango que va desde 1 hasta 1000 nanogramos, utilizando soluciones estándar previamente preparadas a partir de una solución patrón de Hg con una concentración de 1000 ppm (microgramos por gramo). Esto nos permite generar una curva de calibración que posteriormente será sometida a una prueba de precisión y exactitud como parte del control de calidad. Los resultados obtenidos deben estar dentro de los límites aceptables según los parámetros establecidos.

Cálculo para determinar el % de los estándares de control para la calibración diaria o verificación de la curva.

- **Porcentaje de diferencia para los estándares**

$$\%D = \frac{(\text{Valor verdadero} - \text{Valor encontrado})}{\text{Valor verdadero}} \times 100 \quad (07)$$

- **Diferencia porcentual relativa (RPD)**

$$\%R = \left[ \frac{(\text{LFM conc} \times (\text{Vol adicionado} + \text{Vol muestra}) - (\text{Conc muestra} \times \text{Vol muestra}))}{\text{Conc solución adicionada} \times \text{Vol de Adición}} \right] \times 100 \quad (08)$$

Donde:

LFM conc = Concentración de la Matriz fortificada de laboratorio.

Vol = volumen

La recuperación oscila entre 70 % - 130 %.

Nota: el volumen adicionado NO debe aumentar el volumen de la muestra en más del 5 % (Chen *et al.*, 2008).

El reporte para el cálculo de la concentración de mercurio (Hg) de acuerdo con la referencia a la curva de calibración es generado en el software del equipo DMA-80 con unidades (0,1 g = 100 µL) de acuerdo a la configuración inicial (Cheng *et al.*, 2021).

#### 5. Ensayo por mercurio total y longitud de Onda Hg

Para analizar la cantidad de mercurio utilizando el espectrofotómetro de emisión atómica por plasma microondas 4210 MP-AES, se empleó una longitud de onda

específica, que es la más efectiva para este propósito, conocida como "punto isobéptico," y su valor es de 435,834 nm.

## 6. Espectrofotómetro de Emisión Atómica mediante Plasma Microondas 4210 mp-aes

### - Curvas de calibración

La curva de calibración inicial incluye un reactivo en blanco y estándar de mercurio a 1 000 ppm, para el rango de concentración versus la intensidad para evaluar el método analítico, se ha realizado los siguientes pasos:

**Paso 1**, se ha tomado tres volúmenes de (250  $\mu$ L, 500  $\mu$ l y 1 000  $\mu$ L) del estándar de mercurio.

**Paso 2**, se procedió a la disposición del estándar en recipientes de vidrio de tipo fiola, ajustándose con precisión a un volumen de 100 mililitros mediante la incorporación de agua desionizada.

**Paso 3**, se procedió a realizar la lectura en el software para determinar la curva de calibración que se expresa mejor entre la absorbancia (A) y la concentración (C), se emplean cálculos (Cheng *et al.*, 2021).

$$A = mC + b \quad (09)$$

Se puede demostrar de la siguiente manera:

$$m = \frac{n \sum AC - \sum A \sum C}{n \sum C^2 - (\sum C)^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{\sum A}{n} - m \frac{\sum C}{n} \quad (11)$$

Donde:

A = absorbancia.

C = concentración.

m = pendiente de curva (factor de comprobación)

b = intersección del valor de absorbancia o del eje "y".

n = N° de observaciones

Para la metodología del análisis de suelo de las especies se describe en la tabla 9.

Tabla 9

*Metodología para el análisis de suelo de las especies*

N°	Ensayo	Denominación	Descripción		
			Cod.Serv	(1) Norma o Referencia	
1	Metales Por ICP MS/ICP OES	Metales Por ICP MS/ICP OES	MA 1124	EPA Method 3050B	Rev.2.1996/EPA Method 6010D
				Rev.5. 2018/EPA Method 6020 B	Rev.2. 2014/Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils/Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry/Inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry.
2	Mercurio	Mercurio	MA 0370	EPA Method 7471 B. Rev 2. 2007.	Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold Vapor Technique ).

#### e) Análisis estadístico

Este análisis estadístico se realizó empleando el software R-Studio, siguiendo el enfoque previamente utilizado en investigaciones anteriores (Bortoloti & Baron, 2022), dicho software se manejó para cuantificar los entornos ecológicos en situación de riesgo y evaluar las concentraciones de mercurio en las especies, con el propósito de identificar patrones de concentración similares en los puntos de muestreo.

#### f) Prueba de hipótesis

**Hipótesis nula:** No existe el efecto de la capacidad de concentración de mercurio en la (*Bellucia pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

**Hipótesis alterna:** Existe el efecto de la capacidad de concentración de mercurio en la (*Bellucia pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

Para poner a prueba la hipótesis de trabajo, se aplicó un diseño bloque completo al azar (ANOVA) utilizando los tres puntos de muestreo (bloque) y las especies de plantas como tratamientos a un nivel de significación del 5% previa verificación de los

supuestos de normales de errores, además los datos se han transformado a raíz cuadrada + 0,5 para realizar el ANOVA para evaluar las diferencias significativas en las concentraciones de mercurio debidas a la contaminación minera artesanal en el distrito de Yanahuaya, provincia de Sandía. El modelo aditivo lineal utilizado para este propósito es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \tau_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1,2,3 \\ j = 1,2,3,\dots,b \end{cases} \quad (12)$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Es la variable de respuesta de concentración Hg.

$\mu$ : Media poblacional;

$\beta_j$  : Es el j-ésimo punto de muestreo (3 puntos);

$\tau_i$ : es el efecto i-ésimo especie de planta (3 especies);

$\epsilon_{ij}$ : Error experimental o error aleatorio  $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$

El propósito del modelo estadístico es calcular la influencia de los tratamientos con el fin de evaluar la hipótesis relacionada con los diferentes niveles del factor. Para lograrlo, se consideran errores experimentales como variables aleatorias independientes que siguen una distribución con media cero y varianza constante, según lo indicado por (Ñaupas *et al.*, 2014).

### **3.5.2. Precisar la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandía**

Es importante señalar que esta estrategia tomó en consideración tanto los aspectos humanitarios relacionados con la población local, específicamente los mineros que viven en la zona, como los aspectos medioambientales relacionados con el entorno natural. En este último aspecto, se tuvieron en cuenta cuatro elementos fundamentales de cada especie: el suelo, las raíces, el tallo y las hojas. Estos componentes determinaron los puntos de muestreo debido a su importancia en el contexto de la contaminación del lugar (MINAM, 2014).

- **Procedimiento metodológico**

El método empleado para determinar la cantidad de mercurio en las especies implicó un proceso que constó de cuatro etapas, de la siguiente manera:

- a) Recolección de datos en campo
- b) Caracterización de las especies
- c) Monitoreo realizado en campo
- d) Ensayos en laboratorio
- e) Análisis estadístico

#### a) Recolección de datos de campo

Para llevar a cabo esta clasificación de las especies, se tuvieron en cuenta factores relacionados con la forma del terreno, las características del suelo y el clima. Como último paso, se asignó un nombre a cada conjunto, denominado "asociación", siguiendo las convenciones de la nomenclatura fitosociológica (ver tabla 10).

Tabla 10

*Ficha para la recolección de muestras para (Kniphofia pauciflora B.)*

N° Muestreo		01	02	03
Lugar		-	-	-
Tiempo		-	-	-
Superficie		-	-	-
Coordenadas	Este	-	-	-
	Norte	-	-	-
Elevación		-	-	-
Disposición		-	-	-
Pendiente		-	-	-
Cobertura vegetal		-	-	-
Especies		-	-	-

#### b) Caracterización de las especies

Las muestras recopiladas en la región de estudio fueron transportadas al laboratorio de Taxonomía de la Escuela Profesional de Ciencias Agrarias de la UNA-Puno con el propósito de llevar a cabo su análisis y correcta identificación.

Los datos obtenidos en el laboratorio indicaron que el organismo vegetal proporcionado pertenece a la especie (*Kniphofia pauciflora B.*), que es conocida como

"*Kniphofia*" según la clasificación filogenética desarrollada por Adolph Engler. A continuación, se presenta la ubicación taxonómica correspondiente (tabla 11).

Tabla 11

*Clasificación filogenético de Adolph Engler (Kniphofia pauciflora B.)*

Reino	Vegetal
Sub reino	Phanerogamae
División	Angiospermae
Clase	Monocotyledoneae
Sub clase	Methachlamydeae
Orden	Liliales
Familia	Liliaceae
Genero	Kniphofia
Especie	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>

### c) Monitoreo realizado en campo

En la región de estudio se ha identificado la (*Kniphofia pauciflora B.*) como la especie predominante ubicado mediante coordenadas (ver tabla 12). Posteriormente, se llevaron a cabo recopilaciones de muestras de suelo en áreas cercanas a los desechos mineros, de donde la planta obtiene sus nutrientes. Asimismo, se procedió a la recolección de la raíz, el tallo y las hojas de esta misma especie. Estas muestras fueron luego cuidadosamente empacadas y etiquetadas con información detallada, que incluye el tipo de muestra, las coordenadas geográficas, el tiempo y hora de la recolección, el comprometido de la misma y el tipo de análisis que se llevará a cabo (MINAM, 2014).

Tabla 12

*Coordenadas UTM de los puntos de muestreos para (Kniphofia pauciflora B.)*

Punto de muestreo	Metros al Este	Metros al Norte	Cota (m.s.n.m.)
1	485 625	9 402 631	3 398
2	485 441	8 402 809	3 258
3	485 356	8 403 008	3 009

#### **d) Ensayos en laboratorio**

Se ha seguido la misma metodología para evaluar la acumulación de mercurio en las diferentes partes de estas especies (la raíz, el tallo y las hojas), incluyendo el suelo de su entorno.

##### **1. Sustancias**

###### **- Agua desionizada:**

Se utilizó agua desionizada con una conductividad eléctrica de  $1,2 \mu\text{S}/\text{cm}$  para evitar cualquier influencia adversa en los resultados debido a la presencia de sales en el agua.

###### **- Ácido nítrico (65,8 %; $\rho = 1,395 \text{ g}/\text{cm}^3$ )**

Se ha utilizado con el propósito de descomponer las muestras de materia orgánica, lo que ha permitido la determinación del contenido de mercurio en las muestras.

###### **- Ácido perclórico (70 %; $\rho = 1,668 \text{ g}/\text{cm}^3$ )**

Para la descomposición de las especies se ha utilizado este ácido junto con el ácido nítrico concentrado en una cantidad excesiva, con una proporción típica de 3 a 5 partes de ácido nítrico por cada porción de ácido perclórico, para disminuir su capacidad de reacción, la digestión se realizó en el equipo del laboratorio de la FIM.

Se utilizó una combinación de productos químicos para procesar las muestras de suelo en términos de digestión. Esto incluyó 5 mL de ácido nítrico al 65% (V/V) y 2 mL de ácido sulfúrico al 97% (V/V). Estos reactivos se añadieron a 10 g de tipo de suelo en un recipiente de desatinados de 250 mL y se calentaron en una placa calentadora eléctrica, a una temperatura de  $100^\circ\text{C}$  hasta que el volumen de la mezcla se redujo aproximadamente al 25% de su volumen original. Luego, se filtró y se transfirió a un matraz aforado de 100 mL, donde se completó el volumen con agua destilada, siguiendo el procedimiento descrito en el Método EPA 3050.

#### **e) Análisis estadístico**

Para poner a prueba la hipótesis de trabajo, se aplicó un diseño bloque completo al azar (ANOVA) utilizando los tres puntos de muestreo (bloque) y las especies de plantas como tratamientos a un nivel de significación del 5% previa verificación de los

supuestos de normales de errores, además los datos se han transformado a raíz cuadrada + 0,5 para realizar el ANOVA para evaluar las diferencias significativas en las concentraciones de mercurio debidas a la contaminación minera artesanal en el distrito de Yanahuaya, provincia de Sandia.

#### **f) Prueba de hipótesis**

**Hipótesis nula:** No prevalece una mayor capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

**Hipótesis alterna:** Prevalece una mayor capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

La función primordial del modelo estadístico es determinar la magnitud del impacto de los tratamientos, con el propósito de evaluar la hipótesis vinculada a los diferentes niveles del factor en cuestión. Para llevar a cabo este análisis, se modelan los errores experimentales como variables aleatorias independientes que siguen una distribución con media cero y varianza constante, conforme a las indicaciones propuestas por (Ñaupas *et al.*, 2014).

#### **3.5.3. Detectar la capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia**

Es relevante destacar que esta táctica tuvo en cuenta tanto los aspectos humanitarios vinculados con la comunidad local, en particular los mineros residentes en la zona, como los aspectos ambientales relacionados con el ecosistema natural. En cuanto a este último aspecto, se consideraron cuatro elementos esenciales de cada especie: el suelo, las raíces, el tronco y las hojas. Estos factores determinaron los lugares de muestreo debido a su relevancia en el contexto de la contaminación del área. (MINAM, 2014).

#### **• Procedimiento metodológico**

El método empleado para determinar la cantidad de mercurio en las especies implicó un proceso que constó de cinco etapas, de la siguiente manera:

- a) Recolección de datos en campo
- b) Caracterización de las especies
- c) Monitoreo realizado en campo

- d) Ensayos en laboratorio
- e) Análisis estadístico

#### a) Recolección de datos de campo

Para realizar la categorización de las especies, se consideraron elementos asociados con la topografía, las propiedades del suelo y el clima. Como fase final, se asignó un nombre específico a cada grupo, llamado "asociación", siguiendo las convenciones establecidas por la nomenclatura fitosociológica (tabla 13).

Tabla 13

*Ficha para la recolección de muestras para (Weinmannia sp. L.)*

N° Muestreo		01	02	03
Lugar		-	-	-
Fecha		-	-	-
Área		-	-	-
Coordenadas	Este	-	-	-
	Norte	-	-	-
Altura		-	-	-
Orientación		-	-	-
Pendiente		-	-	-
Cobertura vegetal		-	-	-
Especies		-	-	-

#### b) Caracterización de las especies

Las muestras recolectadas en la región de estudio se trasladaron al laboratorio de Taxonomía de la Escuela Profesional de Ciencias Agrarias de la UNA-Puno con el fin de analizarlas y determinar su identificación precisa.

Los resultados obtenidos en el laboratorio indicaron que el organismo vegetal en cuestión pertenece a la especie (*Weinmannia sp. L.*) conocida como "wichullo" según la clasificación filogenética desarrollada por Adolph Engler. A continuación, se presenta la ubicación taxonómica correspondiente en la tabla 14.

Tabla 14

*Clasificación filogenético de Adolph Engler (Weinmannia sp. L.)*

Reino	Vegetal
Sub reino	Phanerogamae
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledoneae
Sub clase	Archychlamydeae
Orden	Oxalidales
Familia	Cunoniaceae
Genero	Weinmannia
Especie	<i>(Weinmannia Sp. L.)</i>

**c) Monitoreo realizado en campo**

En la zona de estudio, se ha identificado que la especie predominante es la (*Weinmannia Sp. L.*). Posteriormente, se realizaron recopilaciones de muestras de suelo en áreas cercanas a los desechos mineros, de donde esta planta obtiene sus nutrientes. Además, se llevó a cabo la recolección de muestras de la raíz, el tallo y las hojas de esta misma especie. Estas muestras se empacaron y etiquetaron, incluyendo información detallada como el tipo de muestra, las coordenadas geográficas (tabla 15), la fecha y hora de la recolección, la persona responsable y el tipo de análisis que se llevaría a cabo, siguiendo las pautas establecidas por (MINAM, 2014).

Tabla 15

*Coordenadas UTM de los puntos de muestreos para (Weinmannia sp. L.)*

Punto de muestreo	Metros al Este	Metros al Norte	Cota (m.s.n.m.)
1	485 626	9 402 633	3 396
2	485 443	8 402 811	3 257
3	485 358	8 402 009	3 008

**d) Ensayos en laboratorio****1. Reactivos**

- **Agua desionizada**

Se empleó agua desionizada con conductividad de  $1,2 \mu\text{S}/\text{cm}$  con el fin de prevenir posibles influencias negativas en los resultados, evitando la presencia de sales en el agua que pudieran afectarlos.

- **Ácido nítrico (65,8 %;  $\rho = 1,395 \text{ g}/\text{cm}^3$ )**

Se ha empleado con la finalidad de descomponer las muestras de materia orgánica, lo que ha posibilitado la determinación del contenido de mercurio en dichas muestras.

- **Ácido perclórico (70 %;  $\rho = 1,668 \text{ g}/\text{cm}^3$ )**

Para llevar a cabo la descomposición de las especies, se empleó una cantidad excesiva de este ácido, combinado con ácido nítrico concentrado en una proporción típica de 3 a 5 partes de ácido nítrico por cada parte de ácido perclórico. Esta proporción se utilizó para reducir la capacidad reactiva de la mezcla.

**e) Análisis estadístico**

El análisis estadístico se realizó con el software R-Studio. Se adoptó una metodología similar a la empleada en investigaciones anteriores, como lo detallan en su estudio (Tong *et al.*, 2021). El objetivo principal fue determinar las concentraciones de mercurio en las especies, con la finalidad de identificar semejanzas en los patrones de concentración en los lugares de muestreo.

**f) Prueba de hipótesis**

**Hipótesis nula:** No preexiste la mayor capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

**Hipótesis alterna:** Preexiste la mayor capacidad de concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia.

La finalidad del modelo estadístico consiste en calcular la influencia de los tratamientos con el objetivo de evaluar la hipótesis vinculada a los distintos niveles del factor. Para llevar a cabo este proceso, se conceptualizan los errores experimentales como variables aleatorias independientes que siguen una distribución con media cero y varianza constante, conforme a lo señalado por (Ñaupas *et al.*, 2014).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **4.1. Determinar la capacidad de concentración de mercurio de tres especies (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia**

En el primer punto de muestreo, se determinó que la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) presentaba una concentración de mercurio en el suelo de 17,234 mg/kg. En las distintas partes de la planta, se encontraron valores de 3,111 mg/kg en las raíces, 11,807 mg/kg en los tallos y 5,508 mg/kg en las hojas. Estos datos indican que (*Kniphofia pauciflora B.*) exhibe una concentración de mercurio sustancialmente superior en comparación con las otras dos especies identificadas en el estudio. (Ramirez, 2019) ver tabla 16.

Estos resultados apuntan a que (*Kniphofia pauciflora B.*) es la especie predominante en cuanto a la acumulación de mercurio en su estructura, lo que la diferencia de manera significativa de las demás especies estudiadas, tal como se confirmó en un estudio previo realizado por investigadores con referencia a (Ottenbros *et al.*, 2019). Esta averiguación es útil para alcanzar la dinámica de contaminación por mercurio en el ecosistema de la quebrada San Blas y sus posibles implicaciones para la salud ambiental.

Tabla 16

*Concentración de mercurio en las especies de plantas*

Punto Muestreo	Especie	(Hg-mg/kg)			
		Suelo	Raíz	Tallo	Hoja
1	<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	1,944	0,566	0,360	0,193
	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	17,234	13,111	11,807	5,508
	<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,931	0,728	0,624	0,216
2	<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,957	0,458	0,220	0,177
	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	14,365	11,999	10,510	3,891
	<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,660	0,433	0,202	0,156
3	<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,717	0,376	0,149	0,009
	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	4,811	4,649	3,548	0,411
	<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,441	0,366	0,121	0,012

En la figura 13 se presentan los niveles de concentración en el punto de muestro 01, en donde la especie que alberga la mayor cantidad de concentración de mercurio es la (*Kniphofia Pauciflora B.*), así mismo para los investigadores Baragaño *et al.* (2022) determinaron que la concentración de As fue mayor que la de Hg en raíces y se encontraron varias diferencias entre los tratamientos. La movilidad vertical y horizontal a largo plazo del mercurio (Hg) en suelos los investigadores Morosini *et al.* (2021) confirmaron niveles de contaminación en profundidad oscilaron entre aproximadamente 20 mg/kg de peso seco de suelo en la capa superior a menos de 0,1 mg/kg a 1 m de profundidad, la mayor parte de lo extraído el Hg se incluyó en formas poco móviles o inmóviles, algunas especies de plantas (es decir, la alfalfa) demostraron tener una importancia en aumentar las fracciones solubles e intercambiables respecto a los suelos testigo no plantados, afectando así movilidad y biodisponibilidad potencial del Hg. Para determinar la cantidad de mercurio los investigadores Liu *et al.* (2017) examinaron cinco especies de plantas, con sus resultados demostraron que el efecto de diferentes concentraciones de mercurio fueron acumulados en las raíces más que en tallos y hojas respectivamente, analizaron cinco especies de plantas que fueron seleccionadas, las tasas de transferencia de Hg sugirieron su potencial para la fitorremediación de suelos con Hg en concentraciones inferiores a 500 g/L.

Las concentraciones de Cd, Pb y Cu aumentaron significativamente en la raíz y los tallos de las plantas en los tratamientos individuales, en relación con el control, lo que se

manifiesta los investigadores Luo *et al.* (2018) por un aumento de los valores de BCF y TF en las raíces y los brotes de las plantas. Los campos eléctricos con voltaje moderado a alto mejoraron aún más el efecto del quelante al estimular la bioacumulación y translocación de metales en los tejidos vegetales.

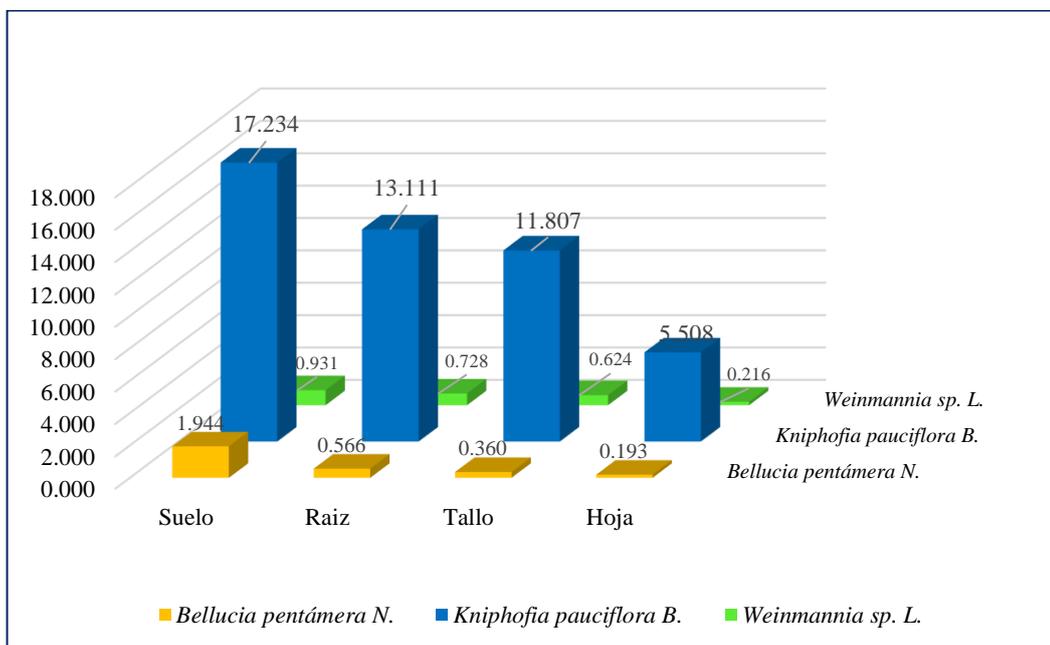


Figura 13. Concentración de mercurio en especies extraídas del punto de muestreo 1

En la figura 14, se observan las mediciones de mercurio en distintas partes de las especies. Destaca que la planta predominante en la concentración de mercurio sigue siendo (*Kniphofia pauciflora B.*) para ser más específico, en la raíz de esta planta se registró una concentración de 11,999 mg/kg, en el tallo se detectaron 10,510 mg/kg, y en las hojas se midieron 3,891 mg/kg. La concentración de Hg en la raíz fue entre 10 y 30 veces mayor que en el tallo señalan los autores Rees *et al.* (2020) la acumulación de Hg fue 7 y 10  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Hg (dos a tres veces menos que las plantas expuestas a 6  $\mu\text{M Hg}$ ), probablemente causado por salpicaduras del medio de crecimiento y/o volatilización durante un periodo de tiempo, por ende los resultados obtenidos por los investigadores son similares a los resultados de este trabajo en la acumulación de mercurio en gran cantidad sobre todo en la raíz.

Por otro lado, las demás especies presentaron niveles de concentración menores en sus partes, lo que sugiere una capacidad limitada para la extracción de mercurio a través de sus sistemas de raíces, tallos y hojas. Esto podría tener implicaciones significativas en términos de la absorción y acumulación de mercurio en diferentes especies vegetales, y

potencialmente en la cadena alimentaria. Así mismo los investigadores Bortoloti & Baron (2022) determinaron acumulaciones de metales pesados entre Hg, As, Pb y zinc (Zn) establecieron mayores concentraciones en la raíz y tallo. La fitorremediación de metales tóxicos por especies como (*Brassica*) es una técnica prometedora, sin embargo, se necesitan más estudios dirigidos a técnicas agronómicas que coadyuven en una alta producción de biomasa vegetal, tolerancia y estructuración de la red de hiperacumulación de estos contaminantes, de modo que su aplicabilidad y la viabilidad se puede utilizar para áreas más grandes. La concentración de Hg en la raíz fue entre 10 y 30 veces mayor que los brotes de control acumularon entre 7 y 10  $\mu\text{g g}^{-1}$  de Hg (dos a tres veces menos que las plantas expuestas a 6  $\mu\text{M}$  Hg) probablemente causado por salpicaduras del medio de crecimiento y/o volatilización los autores (Carrasco *et al.*, 2023) estudiaron las alteraciones fisiológicas causadas por Hg (0, 6 y 30  $\mu\text{M}$ ) en plantas de alfalfa cultivadas con dos niveles diferentes las únicas diferencias significativas en los valores fueron encontradas en raíces expuestas a 6  $\mu\text{M}$  pero no a 30  $\mu\text{M}$  Hg.

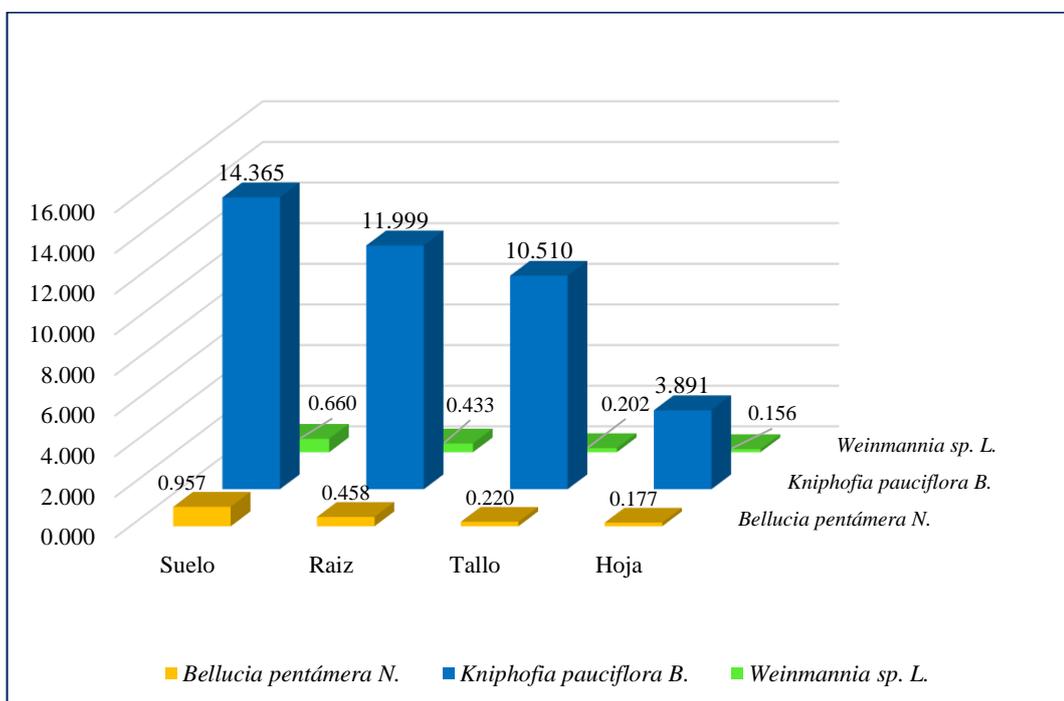


Figura 14. Niveles de mercurio en especies extraídas del punto de muestreo 2

En el punto de muestreo 3 se ha identificado la máxima concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) los valores específicos son los siguientes, en la raíz, se registró 4,649 mg/kg de mercurio, en el tallo, se identificaron 3,548 mg/kg, y en las hojas 0,411 mg/kg de Hg. En contraste, la especie (*Bellucia pentámera N.*) presentó valores de 0,376 mg/kg de Hg en el tallo y 0,149 mg/kg en las hojas, por lo que la especie

(*Weinmannia sp. L.*) reveló 0,366 mg/kg de Hg en la raíz, 0,121 mg/kg en el tallo y 0,012 mg/kg en las hojas (ver figura 15). De similar forma los investigadores Chen *et al.* (2022) determinaron el contenido de Hg en especies que osciló entre 27,5 y 113,9 ng/g (media:  $65,8 \pm 29,4$  ng/g), que fue significativamente mayor que el valor de fondo local del suelo (19,7 ng/g) y el contenido promedio de Hg en el suelo alrededor del área de hundimiento (18,3 ng/g). Para los investigadores Makarova *et al.* (2022) la fitoextracción efectiva de mercurio con trébol blanco (*Trifolium repens L.*) y berros (*Lepidium sativum*) encontraron la mayor acumulación de Hg en la raíz hasta 45  $\mu\text{g/g}$ . Según estudios realizados por (Marrugo *et al.*, 2015), las mayores concentraciones de Hg se acumularon en las raíces con 6,67  $\mu\text{g/g}$ , seguidas de las hojas 0,44  $\mu\text{g/g}$  y en los tallos 0,14  $\mu\text{g/g}$ . Estos valores son de gran relevancia para comprender la distribución y acumulación de mercurio en distintas partes de las especies y tienen implicaciones significativas en términos de la ecología.

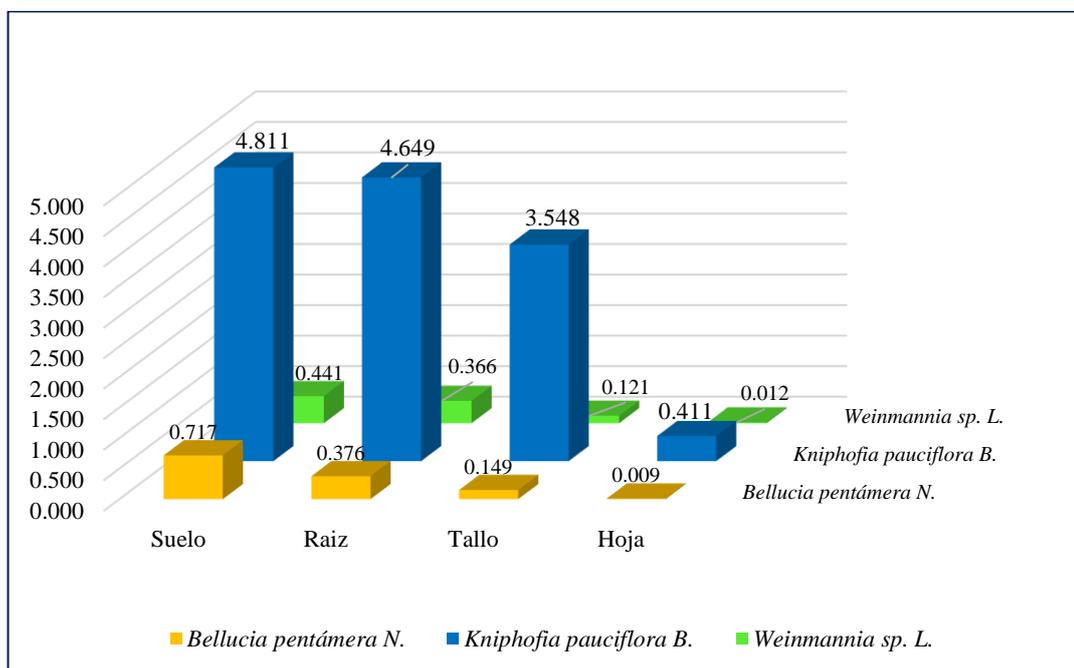


Figura 15. Acumulación de mercurio en especies extraídas del punto de muestreo 3

En la figura 16, se han establecido los puntos de muestreo 1, 2 y 3 en el contexto de la microcuenca San Blas, se ha trazado una línea de corte que conecta el punto 1 con el punto 3. Esta línea de corte se ha diseñado con el propósito de evaluar la pendiente del terreno y medir las distancias entre los puntos de muestreo.

Este enfoque de análisis geoespacial y topográfico es fundamental para comprender la configuración del terreno y la distribución de puntos de muestreo en la microcuenca.

Proporciona información valiosa para evaluar las características del paisaje y su influencia en los datos recolectados en cada punto de muestreo, lo que es esencial en investigaciones relacionadas con la hidrología, la topografía y la geografía.

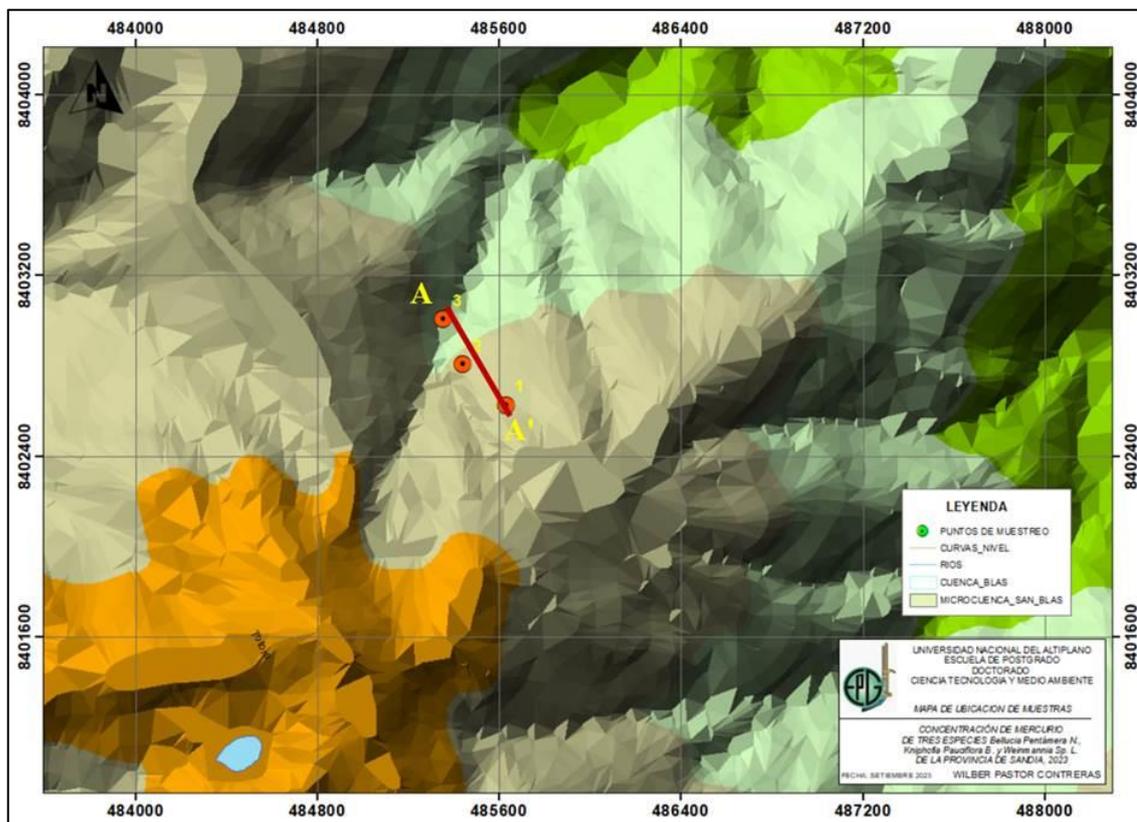


Figura 16. Ubicación de los puntos y la recta cortante

Mediante la representación gráfica de un perfil topográfico, se ha suministrado datos relativos a las distancias entre los puntos de muestreo tal como se visualiza en la figura 17, se resalta la diferencia de altitud del terreno y la distribución de las especies de plantas que están presentes hasta esta altitud.

Es evidente que a medida que nos alejamos de la fuente de contaminación cercana al punto de muestreo número 01, la concentración de Hg tiende a disminuir, esto se debe a la propiedad del mercurio por ser un elemento pesado, lo que provoca a hundirse en el subsuelo y a acumularse en áreas cercanas a la fuente de contaminación, a medida que nos desplazamos de la fuente las concentraciones de mercurio en las plantas son más bajas. Este patrón es consistente con el comportamiento típico de sustancias pesadas en el suelo y tiene implicaciones importantes para la gestión y la evaluación del contagio por Hg en el sitio. Las variaciones en las acumulación de metales pesados como el Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Selenio (Se), Plomo (Pb) y Arsénico (As), se llevó a cabo

mediante un análisis realizado por el investigador Álvarez (2019) para establecer sus resultados muestran que a medida que se aleja de la fuente, los niveles de estos metales exponen una tendencia decreciente logrando alcanzar concentraciones de  $1,23 \pm 0,05$  mg/kg. Mediante las especies *Schoenoplectus californicus* el investigador Rodríguez (2018) encontró acumulaciones de metales arsénico, cobalto, cromo, mercurio, níquel y plomo, que se acumularon en la raíz y en los tallos respectivamente, los valores en los tallos varían de  $0,0827 \pm 0,0170$  mg/kg de Hg. Así mismo en este estudio se identificó una concentración particularmente baja en el punto\_03, ver figura 17.

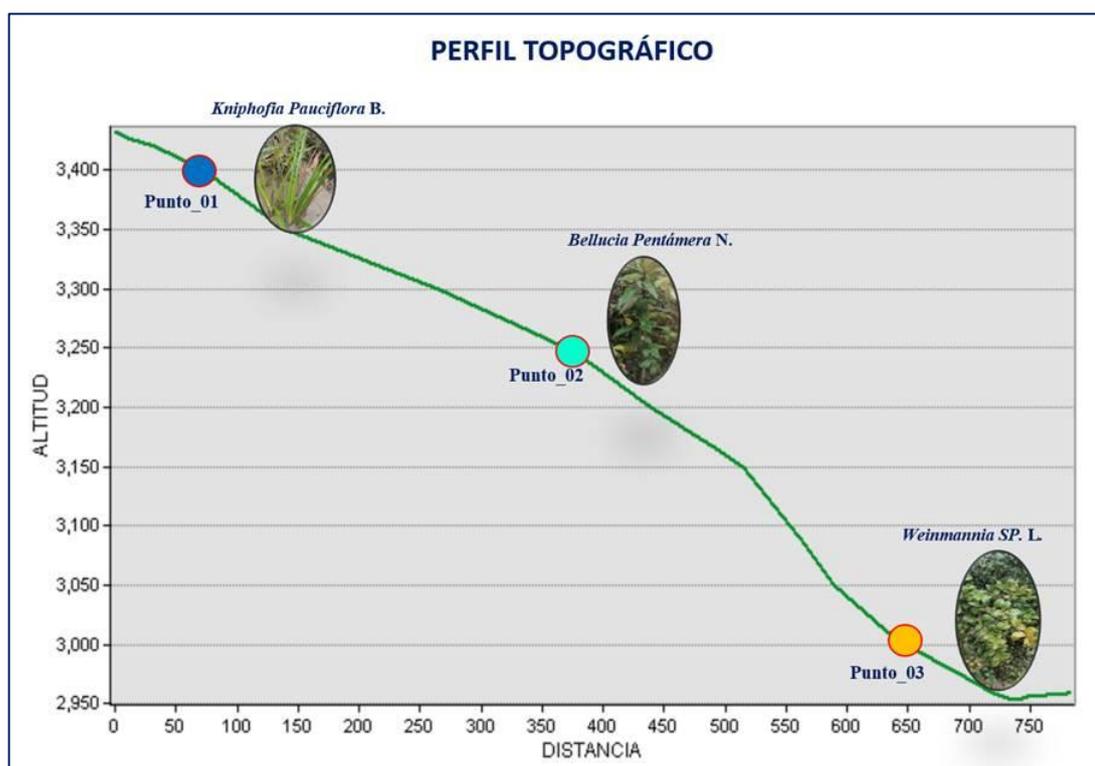


Figura 17. Sección longitudinal y sitio de los puntos de muestro

#### 4.1.1. Análisis y diseño (ANOVA)

Los datos esenciales para el análisis se han recopilado de manera precisa, asegurando la representatividad de las muestras en relación con cada grupo de tratamiento, este contexto corresponde a los puntos de muestro, mediante el uso de software estadístico R-studio. Se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

La técnica estadística se aplicó con el fin de comparar las medias de tres especies de plantas como tratamientos, con el propósito de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos, se buscó determinar si una variable

independiente o factor tiene un efecto significativo en la variable dependiente en estudio. Para determinar el análisis de varianza ANOVA y prueba de homogeneidad de varianza los autores Baragaño *et al.* (2022) realizaron todas las determinaciones analíticas por triplicado, los datos obtenidos fueron tratados estadísticamente mediante el programa SPSS, versión 27.0 para Windows. Mediante el análisis del modelo lineal generalizado para identificar la diferencia significativa que se muestra ( $\alpha = 0,05$ ), los investigadores Ruiz *et al.* (2013) utilizaron regresión lineal para diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para examinar las relaciones entre el contenido de metales pesados en las raíces de la especie.

El ANOVA de Welch detectó discrepancias significativas en las acumulaciones de Zn, Cd, Pb y Cu en los efluentes de las columnas con especies de plantas, los investigadores Lange *et al.* (2020) detectaron diferencias significativas entre distintas especies en sus concentraciones totales y disueltas. Además, la comparación por pares de los investigadores Lindsey *et al.* (1998) sólo confirmó la importancia de estas diferencias para las concentraciones de Pb, el ANOVA de Welch también detectó diferencias significativas entre los efluentes de estas columnas en las concentraciones disueltas de Cd, Cu y Pb.

- **Variable Dependiente**

Concentración de Hg en la raíz, tallo, hoja de las especies denominados, (*Bellucia pentámera N.*), (*Kniphofia pauciflora B.*) y (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas.

- **Variable Independiente**

Tres especies de plantas denominados (tratamientos), y tres puntos de muestreo como bloques.

Se plantearon las hipótesis nulas y alternativas para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos. Se ha evaluado la hipótesis nula utilizando la estadística F y se ha calculado el valor p asociado.

#### 4.1.2. Análisis de varianza para la concentración de Hg en la raíz

### Box-Plot para Especies

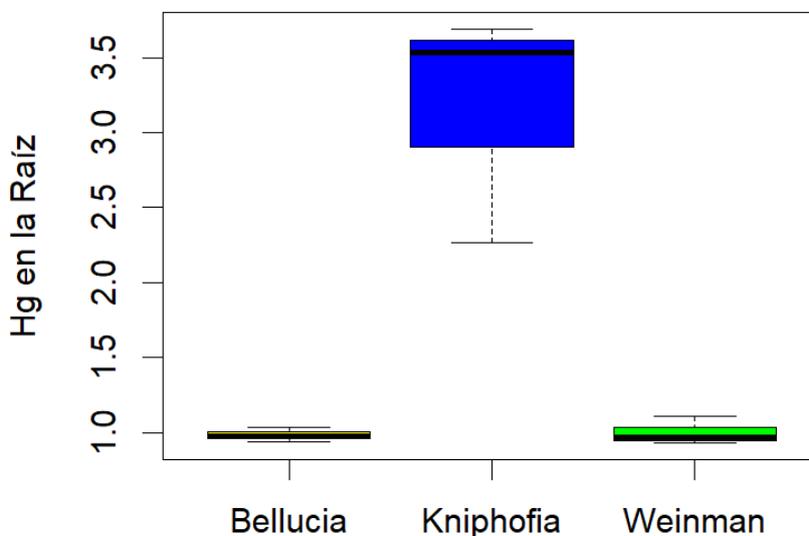


Figura 18. Diagrama de caja para las tres especies

Tabla 17

Análisis de varianza – ANOVA para la raíz de las especies

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Punto	2	0,533	0,267	1,516	0,32356	n.s.
Especies	2	9,441	4,721	26,836	0,00481	** significativo
Residuals	4	0,704	0,176			

Significado de los códigos: 0 ‘\*\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*\*’ 0,01 ‘\*\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘,’ 1

CV. = 24,44%

Los resultados del análisis de ANOVA que se obtuvo, ver tabla 17 el análisis indica que existe diferencia entre las especies de plantas en la variable raíz, sin embargo, para los diferentes puntos de muestreo no se ha encontrado diferencia. En comparación con el tratamiento de control que obtuvieron los autores Yang *et al.* (2023), el raleo aumentó significativamente la riqueza de especies en un promedio de 25,3% ( $p < 0,001$ ) y 26,5% ( $p < 0,001$ ), respectivamente en la raíz de la especie estudiada.

Las diferencias significativas en la longitud de las raíces y los brotes dentro de cada acceso según estudios realizados por Colzi *et al.* (2023) obtuvieron resultados de la

prueba de Tukey. \*  $<0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $<0,001$ , la secuencia de estas notaciones refleja los valores promedio obtenidos de 12 repeticiones acompañados por la desviación estándar. Además, los resultados de la prueba de falta de ajuste revelaron valores de  $p$  en el rango de 0,061 a 0,301 para las raíces y de 0,063 a 0,727 para los brotes.

Al realizar un análisis de varianza (ANOVA) entre las diversas especies de árboles los investigadores Lange *et al.* (2020) y Shahrukh *et al.* (2023) señalan que para una especie arbórea específica, se observó una disparidad significativa ( $p < 0,05$ ) al realizar comparaciones múltiples de las medias mediante la aplicación de la prueba de Tukey.

#### 4.1.3. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

El propósito de esta prueba fue determinar si una muestra de datos sigue una distribución normal (también conocida como distribución gaussiana) o no, la normalidad es una suposición común en muchos métodos estadísticos por lo que es importante verificar si los datos se ajustan a esta distribución.

$W = 0,85011$ ,  $p\text{-value} = 0,07473 > \alpha = 0,05$  no es significativo, entonces los errores se distribuyen en forma normal.

##### a) Prueba de normalidad de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov)

$D = 0,25437$ ,  $p\text{-value} = 0,09632 > \alpha = 0,05$  no es significativo, entonces los errores se distribuyen en forma normal.

##### b) Verificación de homogeneidad de varianza

Prueba de Levene para la homogeneidad de la varianza (centro = "mediana")

Df F value Pr (>F)

Grupo (2) 1,138 0,3811  $> \alpha = 0,05$  esto señala que las varianzas son homogéneas.

Las relaciones de correlación entre Hg y el índice de función en la población de estudio los autores Zhang *et al.* (2020) verificaron el coeficiente de correlación de rango entre Hg y Cr identificaron una cantidad de 0,385 mg/kg, lo que indica una correlación positiva significativa ( $p < 0,01$ ).

Para evaluar la normalidad los investigadores Alajmi *et al.* (2021) y Mwelwa *et al.* (2023) realizaron la prueba de Shapiro-Wilk, con el objetivo de establecer la

variabilidad en la contaminación por metales entre las plantas hospedantes. Calcularon la media y el error estándar de la concentración de cada metal ( $\mu\text{mgg}^{-1}$ ) para cada sitio, especie de planta huésped y especie de insecto comestible.

### c) Comparación de promedios para las tres especies – raíz

En la tabla 18 se ha obtenido la comparación de promedios que se ha analizado la concentración de Hg en la raíz. Se identificaron diferencias significativas entre los grupos, al realizar comparaciones entre todos los pares posibles de grupos para identificar cuáles de ellos difieren significativamente en términos de sus medias. Mediante el método de Tukey que controla la tasa de error tipo I y proporciona una forma efectiva de determinar las diferencias significativas entre grupos.

Tabla 18

*Comparación de promedios para las tres especies*

Especies	Raíz 1	std	r	se	Min	Max
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,9823987	0,0483639	3	0,242148	0,935948	1,03247
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	3,1646141	0,7793117	3	0,242148	2,2691408	3,689309
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	1,001554	0,0939909	3	0,242148	0,9305912	1,108152
	Q25	Q50	Q75			
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,9573617	0,9787747	1,005624			
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	2,9022666	3,5353925	3,612351			
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,9482552	0,9659193	1,037035			

Tukey  $\alpha = 0,05$

Los investigadores Habte *et al.* (2016) realizaron el análisis de ANOVA en su trabajo indicando diferencias significativas al 95% en las concentraciones de medias de los elementos analizados encontró el orden de las concentraciones era  $\text{Mn} > \text{Cu} > \text{Sr} > \text{Zn} > \text{Rb} > \text{Ni} > \text{B}$ . Entre los oligoelementos, el cromo y el selenio mostraron las concentraciones más altas en la raíz de las especies.

Las concentraciones promedio más elevadas de níquel (Ni) en los tratamientos iniciales, registrando valores de 8,03 y 8,02 mg/kg, respectivamente, los estudios realizados por Mupambwa *et al.* (2023) identificaron concentración más baja de Ni detectaron en el tratamiento 6 un valor de 2,85 mg/kg. En relación con ambos elementos, cuya concentración no demostró una tendencia constante con respecto al mes de muestreo, se observó que los cambios en las concentraciones de cromo (Cr) o

níquel (Ni) no estuvieron sujetos a una influencia sistemática del mes de muestreo, aunque fueron significativamente afectados ( $P < 0,001$ ). Para comparar la normalidad de sus datos, los autores Colzi *et al.* (2023) y Helaoui *et al.* (2023) utilizaron la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de t Student para cotejar tratamientos, realizaron un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) sobre los datos para comparar los sistemas.

Tabla 19

*Comparación de grupos*

Especies	Raíz 1	Grupos
( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	0,164614	a
( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	1,001554	b
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,982399	b

Los resultados que indica la tabla 19 proporciona mayor concentración de Hg en la raíz de la planta para (*Kniphofia pauciflora B.*) y son similares la acumulación de Hg en las especies de plantas (*Weinmannia sp. L.*) y (*Bellucia pentámera N.*) es diferente a (*Kniphofia pauciflora B.*) porque obtuvo menores concentraciones de mercurio en la raíz. Este método es especialmente útil después de realizar un análisis de varianza (ANOVA) se ha encontrado una diferencia en las medias de los grupos. Mediante el software R-Studio los investigadores Subramanian *et al.* (2022) realizaron la estimación de estudios de varianza ANOVA para detectar la discrepancia entre las especies seleccionadas a través de los tejidos de las plantas (raíz, tallo y hojas).

Para estimar el nivel de significancia  $\alpha = 0,05$  los investigadores Kumwimba *et al.* (2021), Colzi *et al.* (2023) y (Carrasco *et al.*, 2023) emplearon el análisis de varianza (ANOVA) para discernir posibles disparidades entre medias. Además, se recurrió a las pruebas t de Student para explorar la relación entre parámetros en sedimentos y tejidos vegetales de las muestras, con el propósito de evaluar las concentraciones de metales pesados en las especies estudiadas.

Los valores de bioconcentraciones y factor de translocación se basaron en la distribución y los rasgos funcionales de las cinco zonas de estudio, correlacionaron con la prueba t de pares emparejados y el valor de correlación de Pearson de los factores de translocación, así mismo en este trabajo se obtuvieron resultados (ver tabla19).

#### 4.1.4. El procedimiento de Duncan

El análisis realizado en la raíz de las especies mediante el método de Duncan donde se ha empleado para determinar la diferenciación de especies y los resultados se presentan en la tabla 20. Esto indica que existen diferencias significativas entre los grupos de especies, se identificaron dos grupos distintos en función de los resultados obtenidos. La especie (*Bellucia pentámera N.*) se encuentra en un grupo único con un valor de 3,164614 que se diferencia notablemente de las otras dos especies analizadas.

Tabla 20

*Procedimiento Duncan para la raíz de las especies*

Especie	Raíz 1	Grupos
( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	3,164614	a
( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	1,001554	b
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,982399	b

Las pruebas de significación realizadas en los promedios de los análisis químicos de la especie (*Zea mays L.*), con respecto a los diversos tratamientos de monitoreo, el investigador (Falcon, 2017) utilizó la metodología de Duncan, como resultado de estas pruebas identificó tres grupos distintos en los que se observaron concentraciones elevadas de los elementos Cd, Fe, Cu, Zn, Pb y Mn especialmente en la raíz de la especie en estudio.

La prueba ANOVA unidireccional es utilizado para evaluar los tratamientos fúngicos en cada tipo de especie de plantas, los autores Rosas *et al.* (2023) y Xun *et al.* (2017) emplearon la prueba post hoc de comparaciones múltiples de Duncan con el fin de identificar diferencias significativas, considerando distintos niveles de significancia ( $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  o  $p < 0,001$ ).

Las disparidades entre tratamientos fueron evaluadas por los investigadores Liu *et al.* (2017) mediante un análisis de componentes principales del procedimiento Duncan, con la selección de componentes principales basada en los valores propios.

#### 4.1.5. Método de ajuste del valor P: Bonferroni

Mediante el método de ajuste del Valor P de Bonferroni se realizaron comparaciones simultáneamente, para contrarrestar este riesgo al ajustar los valores p originales al fraccionar el nivel de significancia (alfa) por el número de cotejos realizadas (ver tabla 21).

Se ha calculado el valor p corregido dividiendo el nivel de significancia original (alfa) entre el número de comparaciones (n), es decir,  $p$  corregido =  $\alpha / n$ . para que el umbral de un resultado significativo, reduciendo así la probabilidad de cometer errores de tipo I, al hacer que el umbral de significancia sea más conservador. Los estudios realizados por Kim *et al.* (2022) hicieron uso el método Bonferroni, realizaron comparaciones múltiples de significancia ( $\alpha = 3,34 \times 10^{-5}; \frac{0,005}{4}$  patrones dietéticos/374 metabolitos) utilizaron un umbral de valor P ajustado por Bonferroni de  $9,80 \times 10^{-4} \frac{0,005}{51}$ ).

Para determinar el análisis de varianza (ANOVA) los autores Nsenga *et al.* (2021) y Wei *et al.* (2023) llevaron a cabo tres réplicas biológicas y tres réplicas técnicas, junto con la separación de medias mediante una prueba t Student unidireccional, donde se consideró significativa una diferencia menor a  $p < 0,05$ . Además, para ver la corrección de múltiples comparaciones y controlar el error tipo I, los investigadores Morosini *et al.* (2021) utilizaron el método Bonferroni y así controlar de manera más efectiva el riesgo global de error.

Tabla 21

*Método de ajuste del valor P: Bonferroni*

Especie	Raíz 1	std	r	se	LCL	UCL
( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	0,98239	0,04836	3	0,24214	0,31008	1,65471
( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	3,16461	0,77931	3	0,24214	2,49230	3,83692
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	1,00155	0,09399	3	0,24214	0,32924	1,67386
	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	0,93594	1,03247	0,95736	0,97877	1,00562	
( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	2,26914	3,68930	2,90226	3,53539	3,61235	
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,93059	1,10815	0,94825	0,96591	1,03703	

En la tabla 22 se observa el procedimiento Bonferroni, se realizó para controlar el error en comparaciones múltiples, por lo que es conservador, lo que significa que puede reducir la probabilidad de encontrar diferencias significativas reales, así mismo se obtuvo resultados similares a la prueba de Duncan, esto indica que la prueba realizada es conservadora en la obtención de resultados. Los investigadores Glickman *et al.* (2014) realizaron el ajustes de tipo Bonferroni en su trabajo de investigación, rechazaron las hipótesis nulas con pruebas de hipótesis convencionales, afirmaron un nivel de significancia ( $p. \alpha 0,05$ ), calcularon el valor P y fue pequeño que el nivel de significancia negando la hipótesis nula. Estudios realizados por los autores Sardans *et al.* (2010) y Subramanian *et al.* (2022) efectuaron un análisis de varianza (ANOVA) determinaron diferencias en los niveles de oligoelementos y macronutrientes entre las especies de plantas, llevaron a cabo el cálculo de los elementos de bioconcentración de metales a través de los tejidos de las plantas, incluyendo raíz, tallo y hojas.

Los valores resultantes de bioconcentración y factor de translocación proporcionan evidencia de las diferencias significativas en la absorción y distribución de metales pesados entre las especies de plantas analizadas por los autores Helaoui *et al.* (2023) y Wei *et al.* (2023) al calcular el valor P ( $p. \alpha 0,05$ ), observaron que este fue inferior al umbral de significancia, lo que llevó al rechazo de la hipótesis nula.

Tabla 22

*Procedimiento Bonferroni para raíz de las especies*

Especie	Raíz 1	Grupos
( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	3,1646141	a
( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	1,001554	b
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,9823987	b

La prueba t de student comprueba por grupos para la raíz, el método de ajuste es considerable (bueno) para la especie (*Bellucia pentámera N.*), para la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) 0,0032 – 0,000 y para (*Weinmannia sp. L.*) varía entre 1,0000 - 0,0033 por el método de ajuste del valor P: Bonferroni considerándolo en un solo grupo. Los autores Mwelwa *et al.* (2023) midieron las concentraciones de metales en el suelo y las especies de plantas hospedantes ( $r = 0,6, P < 0,01$ ), se encontró una reciprocidad efectiva débil entre la concentración de metales en insectos comestibles y

plantas hospedantes ( $r = 0,3$ ,  $P < 0,01$ ) y la concentración de metales en insectos comestibles y suelo ( $r = 0,2$ ,  $P < 0,01$ ). Así mismo Coelho *et al.* (2020) sus resultados expresaron como media  $\pm$  error estándar, mediante un análisis de varianza (ANOVA) para comparar los grupos encontraron una diferencia estadísticamente significativa, el análisis se completó con la prueba de Tukey.

#### 4.1.6. Análisis de varianza para la concentración Hg en el tallo

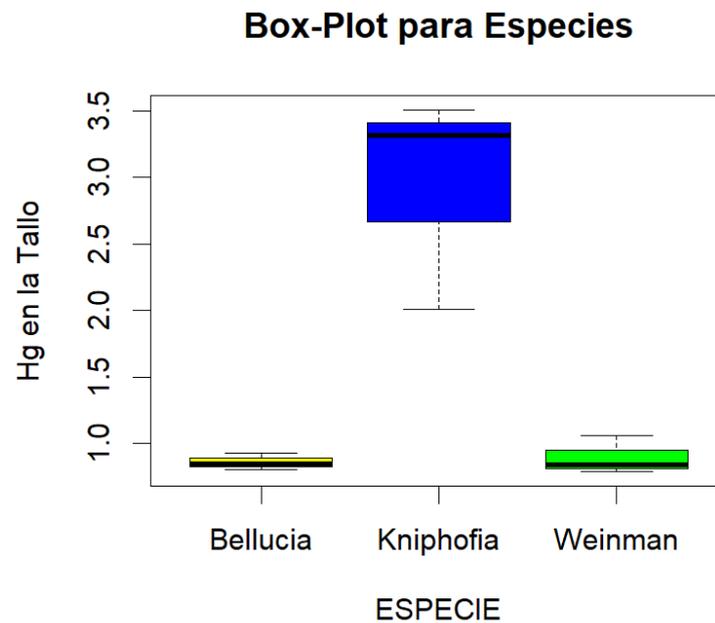


Figura 19. Análisis de varianza para la concentración de Hg en tallo

Tabla 23

Análisis de varianza – ANOVA para la variable tallo

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Punto	2	0,641	0,321	1,744	0,28537	n.s.
Especies	2	8,556	4,278	23,272	0,00626	** significativo
Residuals	4	0,735	0,184			

Signif. codes: 0 ‘\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*’ 0,01 ‘\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘,’ 1

CV. = 27,36%

Los efectos del análisis de varianza (ANOVA) que se presentan en la Tabla 23, indican que hay una diferencia significativa entre las especies de plantas en lo que respecta a

la variable del tallo. Por otro lado, no se hallaron discrepancias significativas entre los diferentes puntos de muestreo. Estos resultados sugieren que las especies de plantas tienen un impacto significativo en la variable del tallo, mientras que la ubicación de muestreo no parece influir de manera significativa en esta variable.

Los principales efectos fijados para las acumulaciones de metales en los brotes, raíces de las plantas y en los suelos, los investigadores Kahangwa *et al.* (2021) y Wang *et al.* (2018) indicaron que fueron las especies de plantas y los tipos de metales, mientras que las réplicas (transectos de muestreo) se trataron como efecto aleatorio, utilizaron un ANOVA para las mediciones compararon las diferencias en las concentraciones de metales pesados dentro de una especie de planta (brotes o raíces) implementaron el ANOVA para las variables medidas, los efectos de las medias significativas se aislaron mediante una prueba Post-hoc Tukey en un umbral (diferencias de medias menos significativas) del 5% ( $P = 0,05$ ).

#### **4.1.7. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el tallo**

Esta prueba consistió en discernir la conformidad de una muestra de datos con una distribución normal, también reconocida como gaussiana. La normalidad, siendo una presunción recurrente en diversos métodos estadísticos, adquiere relevancia al validar la adecuación de los datos a dicha distribución,  $W = 0,86719$ ,  $p\text{-value} = 0,1147 > \alpha = 0,05$  los resultados indican que la prueba no es significativa entonces los errores son normales.

##### **a) Prueba de normalidad de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov)**

La aplicación de la prueba de normalidad de Lilliefors se realizó con el fin de valorar la hipótesis de que la muestra de datos sigue una distribución normal, donde se obtuvo,  $D = 0,24716$ ,  $p\text{-value} = 0,1164 > \alpha = 0,05$  por lo que demuestra que los errores son normales, este procedimiento fue esencial para verificar la conformidad de los datos con los supuestos estadísticos, particularmente en lo que respecta a la distribución normal.

##### **b) Verificación de homogeneidad de las varianzas**

Prueba de Levene para la homogeneidad de la varianza (centro = "mediana"). Grupo (2)  $1,1074 \quad 0,3896 > \alpha = 0,05$  las varianzas son homogéneas, la ejecución de la prueba

de Levene tuvo como propósito principal evaluar la homogeneidad de las varianzas entre diferentes grupos de datos. La homogeneidad de la varianza realizado por los investigadores Zhao *et al.* (2023) evaluaron mediante la prueba de Levene obtuvieron las discrepancias en las acumulaciones de metales de la hojarasca entre las estaciones y los sitios. De manera similar, las diferencias en los valores de  $\delta^{13}C$  foliar entre especies de plantas o entre los sitios de estudio también se analizaron mediante un modelo lineal general con "especie" o "sitio" como efecto fijo, se utilizaron las comparaciones múltiples de Duncan y todos los datos fueron normales.

### c) Comparaciones de promedios para las tres especies – tallo

Las comparaciones de promedios utilizando la prueba de Tukey, se realizó para determinar las diferencias significativas entre múltiples grupos o tratamientos en el análisis de varianza (ANOVA). Esta prueba ha permitido identificar que grupos son significativamente diferentes en términos de sus medias (ver tabla 24).

Tabla 24

*Comparaciones de promedios prueba tukey*

Especies	Tallo 1	std	r	se	Min	Max
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,86049	0,06175	3	0,24754	0,80560	0,92736
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	2,94607	0,81452	3	0,24754	2,01196	3,50813
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,89535	0,14490	3	0,24754	0,78803	1,06018
	Q25	Q50	Q75			
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,82706	0,84852	0,88794			
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	2,66504	3,31813	3,41313			
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,81294	0,83785	0,94902			

Tukey  $\alpha = 0,05$

Para la obtención de la media  $\pm$  desviación estándar, los investigadores Marrugo *et al.* (2015) realizaron la prueba ANOVA mediante comparaciones de medias y pruebas de Tukey, efectuaron la correlación de Pearson para establecer relaciones entre variables seleccionando un nivel de significancia de 0,05.

Asimismo los investigadores Minbashi *et al.* (2023) y Tiziani *et al.* (2023) compararon las medias por un estudio de varianza unidireccional (ANOVA) con la prueba post-hoc de Tukey con un umbral de significancia de  $p < 0,05$  para el análisis estadístico del curso temporal, realizaron diferentes tratamientos tanto para cada punto temporal como para

todo el período de crecimiento mediante un ANOVA de dos vías con prueba post hoc de Tukey con un umbral de significancia de  $p < 0,05$ . Se realizó las comparaciones de los grupos de las especies que se asemejan los resultados para (*Weinmannia sp. L.*) 0,89536 y (*Bellucia pentámera N.*) = 0,860498 (ver tabla 25).

Tabla 25

*Resumen de comparaciones de los grupos*

Especies	Tallo 1	Grupos
( <i>Kniphofia pauciflora B.</i> )	2,946077	a
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,89536	b
( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	0,860498	b

La mayor concentración de Hg en el tallo de la planta para (*Kniphofia pauciflora B.*) con un valor de 2,946077 y son similares la concentración de Hg en las especies de plantas (*Weinmannia sp. L.*) y (*Bellucia pentámera N.*) y es diferente a (*Kniphofia pauciflora B.*). Al hacer las comparaciones con otros autores como Cazzaniga *et al.* (2023) organizaron mediante grupos de comparaciones al ( $p < 0,001$ ). El efecto de los bloques fue significativo ( $p < 0,001$ ) pero limitado ya que explicó sólo el 7,2, 6,4 y 8,4 % de la variación entre las concentraciones en el tallo de la especie que han estudiado.

Mediante la prueba paramétrica ANOVA (prueba de Tukey) los autores Kujawska & Pawłowska (2022) analizaron estadísticamente los indicadores del valor promedio de parámetros (Grupos Homogéneos de Tukey). La presencia del mismo indicador designa la falta de diferencia estadísticamente significativa entre ellos.

#### 4.1.8. Prueba de Duncan

La prueba de rangos múltiples de Duncan, ha sido ejecutada con el objetivo de hacer un análisis exhaustivo de comparaciones múltiples con la finalidad de discernir las diferencias de significancia estadística entre los diversos grupos o tratamientos presentes en el contexto de este estudio. En esta prueba realizada se ha identificado los pares de los grupos (*Weinmannia sp. L.*) y (*Bellucia pentámera N.*), estos grupos difieren significativamente (ver tabla 26).

Tabla 26

*Prueba de Duncan*

Grupos	Tallo 1	Grupos
( <i>Kniphofia pauciflora</i> B.)	2,9460765	a
( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,8953595	b
( <i>Bellucia pentámera</i> N.)	0,8604984	b

Los investigadores Antoniadis *et al.* (2021) analizaron estadísticamente con ANOVA y las diferencias significativas entre los tratamientos, compararon con la prueba de rangos múltiples de Duncan al nivel de significancia de  $p < 0,05$ , así mismo realizaron el ajuste de los niveles de significancia con las pruebas de corrección de Bonferroni para controlar los riesgos.

Para determinar la normalidad y la homogeneidad de la varianza, los investigadores Zantis *et al.* (2023) comprobaron mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, el ANOVA unidireccional con un nivel alfa de 0,05 de diferencia en la prueba de medias para evaluar si los resultados eran estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%. Así mismo los investigadores Bhat *et al.* (2022) el análisis de varianza ANOVA fue significativo ( $p < 0,05$ ) luego realizaron la prueba post hoc de Tukey para determinar efectos significativos entre tratamientos. En este estudio se presentan los valores p ajustados.

**4.1.9. Método de ajuste del valor P: Bonferroni**

El método de ajuste del valor p de Bonferroni se utilizó para controlar el error de tipo I (falsos positivos) para las pruebas de hipótesis simultáneamente, en la posibilidad de realizar al menos un error de tipo I para garantizar que el nivel de significancia ajustado sea más estricto, por lo tanto, se requiera evidencia más fuerte para rechazar la hipótesis nula en cada prueba individual (ver tabla 27).

Tabla 27

*Método de ajuste del valor P: Bonferroni*

Especie	Tallo 1	std	r	se	LCL	UCL
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,860498	0,06175	3	0,24754	0,17320	1,54779
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	2,946077	0,81452	3	0,24754	2,25878	3,63337
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,89536	0,14490	3	0,24754	0,20806	1,58265
	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,805605	0,92736	0,82706	0,84852	0,88794	
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	2,011964	3,50813	2,66504	3,31813	3,41313	
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,788036	1,06018	0,81294	0,83785	0,94902	

Especies, medias e IC individual (95 %)

En la tabla 28 se muestran los resultados de los tratamientos de los grupos, se tiene 2,9460765 para el tallo de la especie (*Kniphofia pauciflora B.*).

Mediante el análisis de varianza unidireccional ANOVA los investigadores Luo *et al.* (2019) determinaron las diferencias significativas entre los parámetros en  $P < 0,05$  de las concentraciones de metales en toda la planta y sus correspondientes concentraciones en la raíz, tallo y hojas de la especie, al realizar las pruebas de comparación múltiple de Tukey, emplearon el método Bonferroni como una corrección para controlar el error tipo I.

Las concentraciones promedio de metales se analizaron estadísticamente en la raíz de la especie vegetal utilizando un programa estadístico R, los investigadores Sharma *et al.* (2021) utilizaron la prueba t de Student ( $P 0,001$ ) para cotejar los valores antes y después de la fitorremediación in situ de la acumulación de metales por las plantas.

Tabla 28

*Tratamiento de los grupos, Bonferroni*

Especies	Tallo 1	Grupos
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	2,9460765	a
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	0,8953595	b
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	0,8604984	b

La clasificación cruzada de pruebas en la fracción con hipótesis nulas que son verdaderas versus falsas y aquellas cuyas hipótesis nulas son rechazadas versus no rechazadas, Glickman *et al.* (2014) clasificaron en grupos de (a-c) donde no rechazan la hipótesis nula y los grupos (b-d) rechazan las hipótesis nulas. Las variables a, b, c, d son las fracciones de pruebas dentro de cada una de las cuatro categorías clasificadas cruzadas.

El análisis de ANOVA realizado por los autores Mtemi *et al.* (2023) fue seguido por pruebas t pareadas entre los grupos, utilizando el método de Bonferroni, observó que el arsénico y el Cd eran considerablemente más altos en el sitio de la mina en relación a (caña de azúcar para As, arrozal para Cd), concentraciones de metales/metaloideos (en mg/kg) en el suelo comparadas entre la mina y los dos sitios de referencia, utilizando el método de diferencia significativa de Tukey \* =  $p < 0,05$ ; \*\* =  $p < 0,01$ ; \*\*\* =  $p < 0,001$  basado en pruebas t de dos muestras.

#### 4.1.10. Análisis de varianza para la concentración de Hg en las hojas

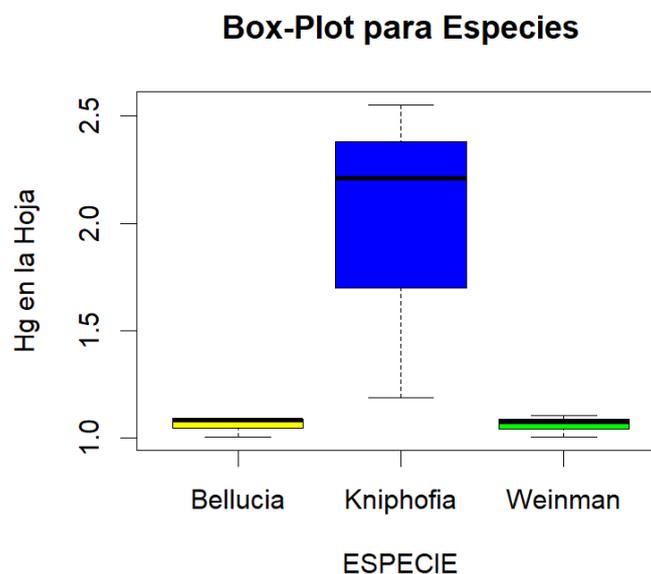


Figura 20. Análisis de varianza para la concentración de Hg en hoja

Tabla 29

Análisis de varianza – ANOVA de las especies en hojas

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Punto	2	0.4347	0.2173	1.493	0.328	
Especies	2	1.7023	0.8512	5.848	0.065	No es significativo
Residuals	4	0.5822	0.1456			

Significado de los códigos: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 ',' 0,1 ';' 1  
CV. = 27,88%.

Según los resultados obtenidos en la tabla 29, se dice que no existe diferencia en la concentración de Hg en las tres especies de plantas en las hojas analizadas, por consiguiente, ya no es necesario realizar la comparación de promedios. Los estudios realizados por investigadores Yang *et al.* (2023) manejaron la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene para examinar la normalidad y homogeneidad de las varianzas. Para probar si había una diferencia significativa en el RR de la riqueza de metales pesados en especies de plantas, utilizaron ANOVA y la comparación múltiple de Duncan para probar cada variable categórica.

Así mismo los autores Shahrukh *et al.* (2023) realizaron el análisis estadístico en el software R-Studio aumento de manera significativamente la riqueza de especies de arbustos y hierbas en un promedio de 25,3% ( $p < 0,001$ ) y 26,5% ( $p < 0,001$ ) respectivamente tal como en este trabajo se obtuvo resultados.

#### **4.1.11. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en hojas**

La finalidad de la presente prueba se centró en la determinación de la adecuación de la muestra de datos a una distribución normal, comúnmente conocida como distribución gaussiana, en el que determinó  $W = 0,94347$ ,  $p\text{-value} = 0,6189 > \alpha = 0,05$  en donde estos errores indican que son normales.

##### **a) Prueba de normalidad de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov)**

$D = 0,15269$ ,  $p\text{-value} = 0,7886 > \alpha = 0,05$ , los errores son normales

##### **b) Prueba de Levene para la homogeneidad de la varianza (centro = "mediana")**

Grupo (2)  $1,9575 \quad 0,2216 > \alpha = 0,05$ , estos resultados señalan que las varianzas son homogéneas.

Las diferencias significativas en el contenido medio de metales pesados Zunaidi *et al.* (2023) analizaron diferentes partes de la planta (hoja, tallo y raíz) de cada uno de los seis vegetales mediante estudio de varianza unidireccional (ANOVA) y pruebas de Tukey con niveles de significancia del 5%. Antes del ANOVA, verificaron la

normalidad y la homogeneidad de la varianza de los conjuntos de datos utilizando las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y las pruebas de Levene respectivamente.

Para analizar la distribución gaussiana y su homogeneidad los investigadores Agostini *et al.* (2020) demostraron mediante una prueba preliminar de varianza ANOVA, la prueba de Shapiro-Wilk, la prueba de Levene y la prueba de Bartlett, respectivamente, mediante lo cual obtuvieron diferencias significativas al 5% en diferentes órganos de la planta.

### c) Comparación de promedios para las tres especies – hojas

En la tabla 30 se presenta la comparación de promedios que ha sido realizada para identificar la concentración de mercurio (Hg) en las hojas, se han detectado diferencias estadísticamente significativas entre los grupos al llevar a cabo comparaciones entre cada par posible de grupos, con el objetivo de identificar aquellos que difieren de manera significativa en términos de sus medias. Este análisis se llevó a cabo mediante el método de Tukey resultando 5,040241 (0,05) el cual controla la tasa de error tipo I y ofrece una forma efectiva de determinar las diferencias significativas entre los grupos analizados.

Tabla 30

*Pruebas de comparación de los promedios de tres especies*

Especies	Hoja 1	std	r	se	Min	Max
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	1,06054	0,04868	3	0,22026	1,00449	1,09224
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	1,98349	0,70965	3	0,22026	1,18785	2,55107
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	1,06129	0,04984	3	0,22026	1,00598	1,10272
	Q25	Q50	Q75			
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	1,04469	1,08489	1,08857			
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	1,69970	2,21156	2,38131			
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	1,04057	1,07517	1,08894			

Tukey  $\alpha = 0,05$

Mediante la prueba de Kruskal-Wallis (ANOVA no paramétrica) seguida de un ensayo de Dunn post-hoc con corrección de Bonferroni para comparación por pares según Stammel *et al.* (2022) indican diferencias significativas entre los grupos de hábitat para cada indicador (columna), donde letras iguales significan que no hay diferencias

significativas entre dos grupos de hábitat (ANOVA de Kruskal-Wallis y prueba post-hoc pareada por pasos).

La técnica de transformación mediante la adición de 0,5 a la raíz cuadrada, seguida de un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) realizado por los autores Yinebeb *et al.* (2022) tuvo como objetivo identificar diferencias significativas entre los sitios, llevaron a cabo comparaciones múltiples de las medias de las especies utilizando el procedimiento de Tukey.

Tabla 31

*Resumen de comparaciones de las especies por grupos*

Especies	Hoja 1	Grupos
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	1,983498	a
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	1,061293	A
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	1,060544	A

La tabla 31 exhibe resultados que señalan la clasificación por grupos (a) estos parámetros adquieren particular relevancia después de realizar un análisis de varianza (ANOVA), que reveló diferencias significativas en las medias de los grupos. Los investigadores Stammel *et al.* (2022) indican que existen diferencias significativas entre los tipos de especies de los cinco indicadores para todos los hábitats de la región de referencia (Kruskal-Wallis-ANOVA  $p < 0,001$ ,  $n = 1,688$ ,  $FG = 4$ ), aunque la desviación estándar es muy alta.

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk, los resultados expresaron como medias  $\pm$  desviación estándar Pelcová *et al.* (2021) utilizaron las pruebas post-hoc ANOVA y LSD para evaluar las diferencias estadísticamente significativas entre variables con un nivel de probabilidad de  $p < 0,05$ . Los coeficientes de correlación ( $r$ ) y probabilidad de significancia ( $p$ ) se calcularon para el ajuste de regresión lineal Wang *et al.* (2020) indican que las diferencias se declaran como significativo en los casos de  $p < 0,05$ .

#### 4.1.12. Método de ajuste del valor P: Bonferroni

Mediante el método de ajuste del valor P: Bonferroni se determinó el nivel de significancia original (alfa) para el análisis de las especies en hojas, por lo que se ha

dividido el nivel de significancia original por el número total de pruebas, como resultado nos dio el nivel de significancia ajustado para cada prueba (ver tabla 32).

Tabla 32

*Método de ajuste del valor P: Bonferroni*

Especie	Hoja 1	std	r	se	LCL	UCL
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	1,06054	0,04868	3	0,22026	0,44898	1,67210
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	1,98349	0,70965	3	0,22026	1,371934	2,59506
<i>(Weinmannia ps. L.)</i>	1,06129	0,04984	3	0,22026	0,44973	1,67285
	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
<i>(Bellucia pentámera N.)</i>	1,00449	1,09224	1,04469	1,08489	1,08857	
<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	1,18785	2,55107	1,69970	2,21156	2,38131	
<i>(Weinmannia sp. L.)</i>	1,00598	1,10272	1,04057	1,07517	1,08894	

Especies, medias e IC individual (95 %)

Al hacer las comparaciones con los autores Mello *et al.* (2020) sus datos cuantitativos se expresaron como media  $\pm$  desviación estándar utilizando el software R v 3.3.3, utilizaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene para analizar la regularidad y homocedasticidad de los datos para seleccionar el tipo de análisis de varianza (ANOVA) utilizaron la prueba de ajuste del valor P: Bonferroni para comparar los tratamientos con el grupo control, y las discrepancias se consideraron significativas al  $p < 0,05$ .

Para examen de la significancia estadística de los resultados mediante un intervalo de confianza del 95% los autores Chanaka *et al.* (2019) incluyeron la aplicación de ANOVA unidireccional, seguido por un análisis de Bonferroni para una evaluación más detallada.

Para determinar las concentraciones totales de Zn, Pb, Cd y Cu por absorción atómica en horno de llama o de grafito espectrofotometría Dahmani *et al.* (2000) y Sardans *et al.* (2010) realizaron una comparación estadística de medias con estudio de varianza (ANOVA) continuo de Bonferroni prueba ( $p < 0,05$ ) para descartar la hipótesis nula.

#### 4.2. Concentración de mercurio en la especie (*Bellucia pentámera N.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia

Se ha llevado a cabo el estudio de la acumulación de mercurio en la planta (*Bellucia pentámera N.*) en tres ubicaciones distintas de muestreo. Los resultados revelaron variaciones significativas en la acumulación de mercurio en diferentes partes de la especie ver tabla 33.

Tabla 33

*Concentración de mercurio en (Bellucia pentámera N.)*

Punto Muestreo	Especie	(Hg-mg/kg)			
		Suelo	Raíz	Tallo	Hoja
Punto_01	( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	1,944	0,566	0,360	0,193
Punto_02	( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	0,957	0,458	0,220	0,177
Punto_03	( <i>Bellucia pentámera N.</i> )	0,717	0,376	0,149	0,009

En el primer punto de muestreo (01), se encontraron concentraciones de mercurio de 0,566 mg/kg en las raíces, 0,360 mg/kg en el tallo y 0,193 mg/kg en las hojas. En el segundo punto de muestreo (02), las concentraciones de mercurio fueron de 0,458 mg/kg en las raíces, 0,220 mg/kg en el tallo y 0,177 mg/kg en las hojas. Finalmente, en el tercer punto de muestreo (03), se observaron concentraciones de 0,376 mg/kg en las raíces, 0,149 mg/kg en el tallo y 0,009 mg/kg en las hojas ver figura 21.

La absorción de metales pesados por las plantas donde es muy limitada obtener (Ag 6,64 - 16,62 mg/kg, Pt 0,1–0,78 mg/kg) o incluso nula en (Ru, Ir, Os) para Carrasco *et al.* (2023) y Dinh *et al.* (2022) la Fitoextracción de metales en suelos contaminados no ha sido investigada en profundidad, lo que merece más atención debido a sus doble ventaja incluida la remediación del suelo y el beneficio económico. Asimismo para los autores Baragaño *et al.* (2022) las concentraciones de arsénico (As) y mercurio (Hg) observadas superan los límites establecidos para estos elementos, siendo 40 mg/kg y 1 mg/kg, respectivamente. Estos metales tienen la capacidad de ser absorbidos directamente por los sistemas radiculares de las plantas y como resultado, pueden acumularse en niveles perjudiciales en las partes comestibles de las mismas.

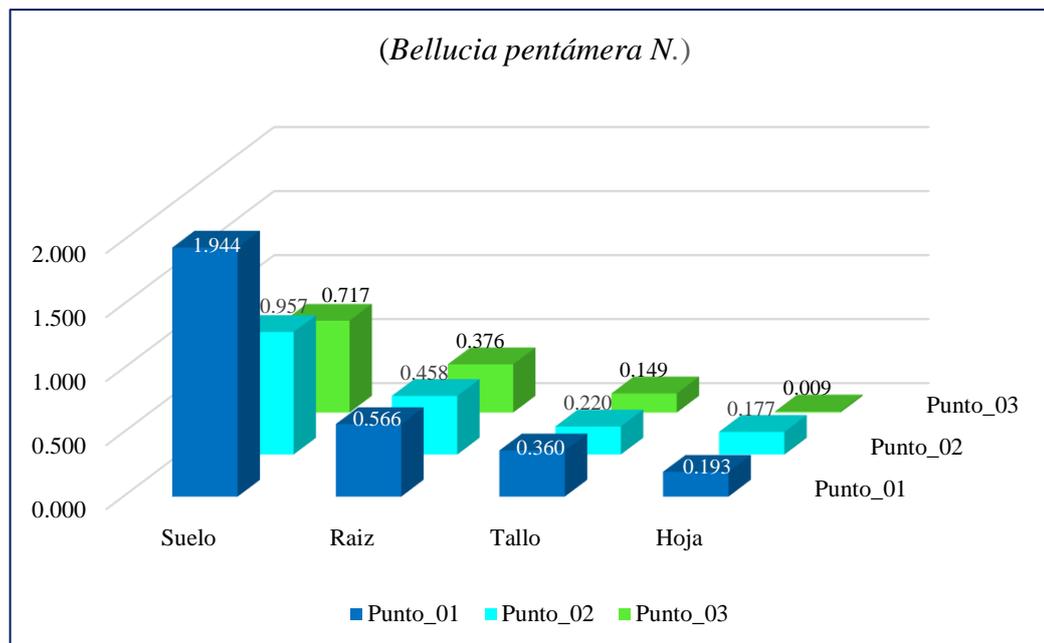


Figura 21. Identificación de Hg en (*Bellucia pentámera N.*)

Estas variaciones en la concentración de mercurio pueden tener implicaciones significativas para la ecología y la fitorremediación, además de destacar la importancia de comprender la dinámica de acumulación de metales pesados en esta especie, se puede utilizar para la biodegradación de elementos pesados que se encuentran en suelos descompuestos con mercurio producto de la minería informal. Estos datos son similares a un estudio de investigación realizado por los autores Kurniawan *et al.* (2022) determinaron la acumulaciones de metales como; Cu, As, Ni, Zn, Pb y Fe, en concentraciones superiores a los valores de adición máxima permisible (MPA), definidos en la normatividad de medio ambiente.

La captación de mercurio (Hg) que abarca la translocación hacia el tallo y la raíz, junto con la ausencia de variaciones observadas en los niveles de tiales en las raíces con presencia de Hg Aghili & Golzary (2023) sugieren la posible idoneidad de *Silene vulgaris* en aplicaciones de fitotecnología para la remediación, la eficacia de esta planta en la restauración de suelos contaminados se evidencia por la acumulación de 4,25 mg/kg de mercurio.

#### 4.3. Concentración de mercurio en la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia

La especie botánica (*Kniphofia pauciflora B.*) se caracteriza por su capacidad única de acumular cantidades significativas de mercurio a través de su sistema de raíces donde

cumple varias funciones, la absorción de metales y el transporte de recursos esenciales del suelo, como agua y nutrientes, así como su almacenamiento. Esto demuestra una distinción en comparación con las otras especies vegetales que se estudiaron en este trabajo, se obtuvieron resultados del análisis realizado en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano. Las muestras extraídas de los tres puntos de muestreo revelaron mayor concentración en la raíz, tallo y hoja de la especie (*Kniphofia pauciflora B.*) los resultados se observan en la tabla 34. La capacidad de absorción, translocación, volatilización y tolerancia del Hg en la especie estudiada por los autores Liu *et al.* (2020) poner en claro la transferencia de genes mediada por vectores/indirecta, su concentración de metales es mayor en la raíz los valores menores de mercurio se presentaron en las hojas.

Tabla 34

*Concentración de mercurio en (Kniphofia pauciflora B.)*

Punto Muestreo	Especie	(Hg-mg/kg)			
		Suelo	Raíz	Tallo	Hoja
Punto_01	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	17,234	13,111	11,807	5,508
Punto_02	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	14,365	11,999	10,510	3,891
Punto_03	<i>(Kniphofia pauciflora B.)</i>	4,811	4,649	3,548	0,411

En el primer punto de muestreo (01), se revelaron concentraciones notables de mercurio, registrando 13,111 mg/kg en las raíces, 11,807 mg/kg en el tallo y 5,508 mg/kg en las hojas. En el segundo punto de muestreo (02), se observaron concentraciones algo menores, aunque aún, considerablemente elevadas, con valores de 11,999 mg/kg en las raíces, 10,510 mg/kg en el tallo y 3,891 mg/kg en las hojas. Al avanzar al punto de muestreo 03, distante de la fuente de contaminación, se produjo una reducción progresiva en las concentraciones de mercurio, culminando en 4,649 mg/kg en las raíces, 3,548 mg/kg en el tallo y 0,411 mg/kg en las hojas (ver figura 22).

El factor de bioacumulación en la especie (*Zea mays L.*) fueron analizados por Munive *et al.* (2018) determinando los metales de plomo (Pb) 36,95 mg/kg y en cadmio (Cd) en la raíz llegó a una concentración de 8,55 mg/kg.

Mediante la fitorremediación de metales pesados Stylianou *et al.* (2020) indican que las especies de plantas nativas silvestres (*Inula viscosa L.*) y (*Allium ampeloprasum L.*) tienen

potencial fitoestabilización de Cd y Pb, y Pb respectivamente, como resultado obtuvieron concentraciones de Al (>1000 mg/kg), Cu (628 mg/kg) y Mn, Zn, Ni (40–400 mg/kg), por lo que recomiendan utilizar estas especies en suelos contaminados por relaves mineros.

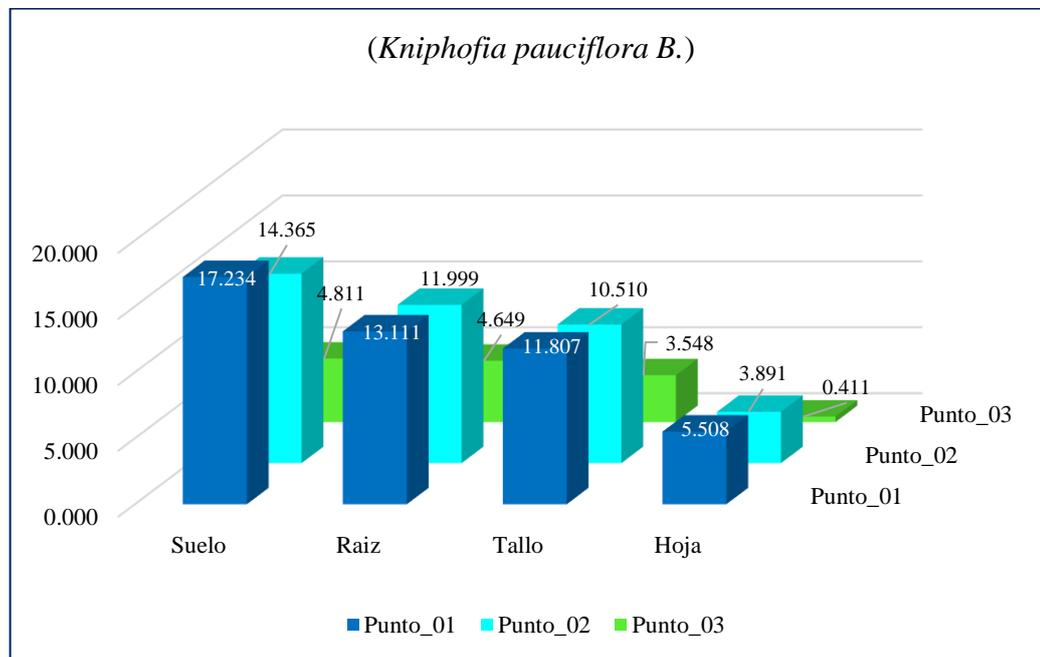


Figura 22. Identificación de Hg en (*Kniphofia pauciflora B.*)

Estos resultados enfatizan la excepcional capacidad de (*Kniphofia pauciflora B.*) para la acumulación de mercurio a través de su sistema radicular, un fenómeno de importancia ecofisiológica y de fitorremediación. Además, se ha llevado a cabo una comparación con investigaciones previas efectuadas por otros expertos. Estudios realizados por los autores (Pietrini *et al.*, 2021) concuerda en gran medida con los efectos, presentaron cantidades significativas de Pb mediante las pruebas de fitoextracción. Así mismo las muestras SP1-SP6 de  $108 \pm 3,45$  mg/kg. Al realizar las comparaciones con los investigadores Ojuederie & Babalola (2017) mediante los criterios para plantas hiperacumuladoras basándose en las concentraciones de metales en el follaje seco (Cd 100, Co, Cu, Cr 300, Pb, Ni 1000, Zn 3000 y Mn ( $\mu\text{g/g}$  respectivamente).

Las elevadas concentraciones de cobre (Cu) y arsénico (As) en los brotes fueron registrados valores de  $45,56 \mu\text{g/mg}$ , los investigadores Kahangwa *et al.* (2021) observaron las concentraciones más elevadas de manganeso (Mn) en los brotes alcanzaron  $2346 \mu\text{g/g}$  de brotes de plantas, mientras que el cromo (Cr) mostró

concentraciones máximas de 1276,7  $\mu\text{g/g}$  en los brotes de las plantas, destacaron las mayores concentraciones de cadmio (Cd) en los brotes, llegando a 144,94  $\mu\text{g/g}$ .

#### 4.4. Concentración de mercurio en la especie (*Weinmannia sp. L.*) de la quebrada San Blas de la provincia de Sandia

Esta especie exhibe notables características de fitorremediación en relación con la acumulación de mercurio en su estructura, en comparación con las otras especies evaluadas. A lo largo de los tres puntos de muestreo, se han registrado concentraciones significativamente más bajas de mercurio en esta planta ver tabla 35, en el punto 1 de muestreo la especie presentó valores mayores de concentración de Hg de 0,728 mg/kg y en el punto 3 estos valores disminuyen significativamente al estar lejos de la fuente de contaminación.

Estudios realizados por los autores Qian *et al.* (2018) han analizado 259 plantas silvestres pertenecientes a 49 especies en 29 familias que crecían en tierras baldías muy contaminadas con Hg compuestas de relaves de minas por tanto, en plantas como en suelos variaron con rangos de 0,076-140 mg/kg de Hg y 0,19-87 ng/kg en raíces, tuvieron concentraciones significativamente elevadas de Hg en brotes y/o raíces que alcanzaron 100 mg/kg, mientras que (*Chenopodium glaucum*, *Corydalisedulis maxim* y *Rumex acetosa*) presentaron valores bajos por debajo de 0,5 mg/kg de mercurio.

Tabla 35

Concentración de mercurio en (*Weinmannia sp. L.*)

Punto Muestreo	Especie	(Hg-mg/kg)			
		Suelo	Raíz	Tallo	Hoja
Punto_01	( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,931	0,728	0,624	0,216
Punto_02	( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,660	0,433	0,202	0,156
Punto_03	( <i>Weinmannia sp. L.</i> )	0,441	0,366	0,121	0,012

En el punto de muestreo 01, se evidenciaron concentraciones mínimas de mercurio, registrando 0,728 mg/kg en raíz, 0,624 mg/kg en el tallo y 0,216 mg/kg en las hojas. En el punto 02, estas concentraciones disminuyeron aún más, con valores de 0,433 mg/kg en las raíces, 0,202 mg/kg en el tallo y 0,156 mg/kg en las hojas. En el punto de muestreo 03, la tendencia de reducción continuó, arrojando cifras de 0,366 mg/kg en las raíces, 0,121 mg/kg en el tallo y 0,012 mg/kg en las hojas ver figura 23. Así mismo los

investigadores Ruiz *et al.* (2013) en su trabajo indican las concentraciones significativamente mayores de Cu, Zn, Mn y Cd, entre 42,0 hasta 1,1 mg/kg.

Las especies de plantas silvestres *Cyrtomium macrophyllum* estudiadas por Xun *et al.* (2017) encontraron valores mayores de concentración de mercurio de 13,90 mg/kg en su raíz y 36,44 mg/kg en sus porciones aéreas, esto indica su capacidad de translocación para absorber el Hg. Así mismo, estudios realizados por los autores Sitarska *et al.* (2023) en su trabajo demostraron que las especies nativas denominados *Lemna minor* y *Salvinia natans* pueden llevar a cabo con éxito la fitorremediación del mercurio de hasta 0,30 mg Hg/dm<sup>3</sup>.

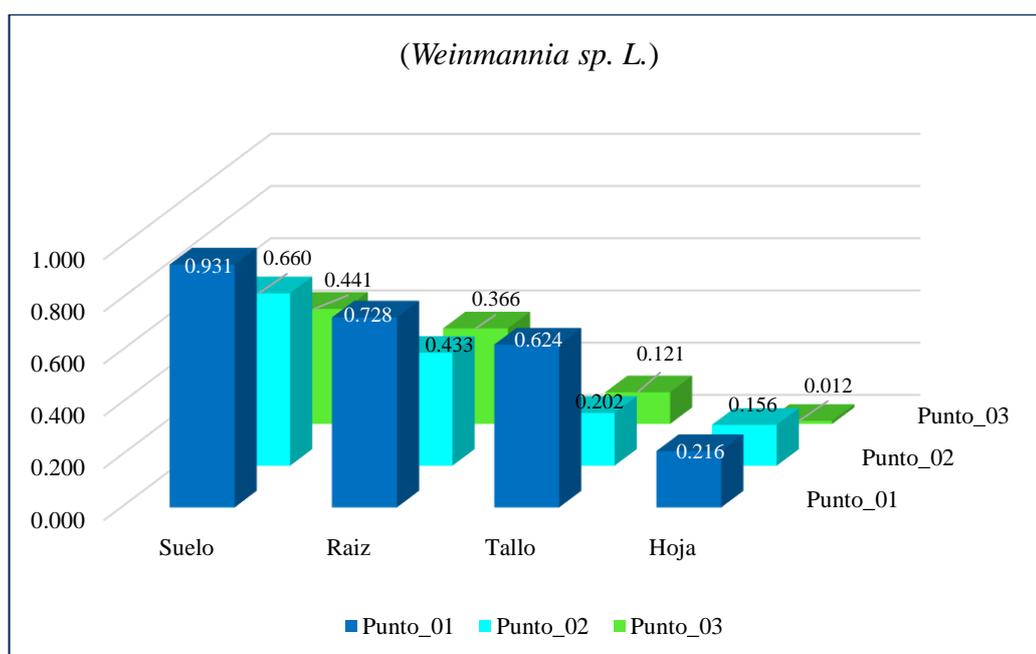


Figura 23. Identificación de Hg en (*Weinmannia sp. L.*)

Estos resultados ponen de manifiesto la sorprendente capacidad de esta especie para la absorción de mercurio de su entorno, especialmente en su sistema radicular y la consecuente acumulación de bajas concentraciones en sus tejidos. Esto sugiere que esta planta podría ser una herramienta valiosa en programas de restauración ambiental y recuperación de suelos contaminados por mercurio, ofreciendo una solución efectiva en la mitigación de la contaminación resultante de actividades mineras ilegales que emplean mercurio como parte de su proceso. La fitorremediación se consolida como una opción prometedora en la rehabilitación de ecosistemas afectados por la presencia de metales pesados, y esta especie en particular demuestra un gran potencial en este campo.

Las especies nativas *Marrubium vulgare* *Pistia stratiotes* estudiadas por Mahajan & Kaushal (2018) demostraron ser enérgicos en la fitorremediación con metales (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, etc.), metales radiactivos (Cs, Sr, U, etc.) estas plantas hiperacumuladoras concentraron aprox. 1000 mg/kg de Hg) especialmente en la raíz obtuvieron mayores concentraciones de metales y a su vez algunas plantas fueron capaces de acumular el metal pesado en su peso seco más del 0,1 %.

Las especies *Phragmites australis* después de 6 semanas expuestas a relaves mineros estudiadas por Naveed *et al.* (2023) obtuvieron cantidades residuales de Cd, Pb y Ni por un total de 93 %, 95 % y 84 %, estas concentraciones fueron encontrados en la raíz en mayor cantidad y seguidamente en los tallos y hojas. estudios realizados por Gómez *et al.* (2023) obtuvieron valores de 10 y 50 mg/kg de Na y 500 -1000 mg/kg de calcio en las especies de plantas nativas.

Las acumulaciones de los elementos como As, Pb y Cd en especies denominados “eucalipto” - *Eucalyptus globulus* Labill y “muña” - *Minthostachys mollis*, mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) fueron estudiadas por Zárate *et al.* (2021) en el que han encontrado medias de metales toxicos de Pb (1,84 mg/Kg ), Cd (0,39 mg/ Kg) y As (0,06 mg/Kg) por que se registraron con mayor cantidad en la raíz y bajas concentraciones en los brotes.

## CONCLUSIONES

La especie botánica (*Kniphofia pauciflora B.*) destaca por su notable capacidad de bioacumulación de cantidades sustanciales de mercurio a través de su sistema radicular, lo hace una diferencia significativamente de otras especies vegetales estudiadas en esta investigación. En el (Punto 01), se evidenciaron concentraciones extraordinarias de mercurio, alcanzando 13,111 mg/kg en las raíces, 11,807 mg/kg en el tallo y 5,508 mg/kg en las hojas. Este fenómeno está relacionado con mecanismos de adaptación de la planta a la presencia de mercurio en su entorno y presenta un interés destacado tanto en términos ecológicos como en posibles aplicaciones para la fitorremediación de suelos contaminados con Hg, contribuyendo así a la restauración de ecosistemas impactados por la minería artesanal de esa zona.

La especie (*Bellucia pentámera N.*) ha sido objeto de estudio en relación a su capacidad para acumular mercurio en diversas partes de su estructura. En el primer punto de muestreo 01, se registraron concentraciones significativas de mercurio en diferentes compartimentos de la planta, se detectaron concentraciones de mercurio de 0,566 mg/kg en las raíces, 0,360 mg/kg en el tallo y 0,193 mg/kg en las hojas. (Punto 2) 0,458 mg/kg en la raíz, 0,220 mg/kg en el tallo y 0,177 mg/kg en las hojas. (Punto 3) se registraron concentraciones de mercurio 0,376 mg/kg en la raíz, 0,149 mg/kg en el tallo y 0,009 mg/kg en las hojas, este resultado indica la competencia de la especie para la absorción de mercurio a través de su sistema radicular. La siembra de esta especie en áreas específicas con altos niveles de mercurio contribuye a la reducción progresiva de la presencia de este metal tóxico en el suelo.

La especie (*Weinmannia sp. L.*) reveló concentraciones mínimas de mercurio en este estudio, con registros de 0,366 mg/kg en las raíces, 0,121 mg/kg en el tallo y 0,012 mg/kg en las hojas. Similar a las demás especies investigadas, también demostró la capacidad de absorber mercurio a través de su sistema radicular, lo que implica que posee un potencial fitorremediador de suelos contaminados con mercurio. Esta planta presenta un gran interés para la reparación de suelos pedantes por la presencia de mercurio, dado su potencial para absorber y mitigar la contaminación de este metal pesado en el entorno.

## RECOMENDACIONES

Ampliar la investigación de manera multidisciplinaria con la aplicación de otros métodos que contribuyan en la recuperación de suelos que contienen metales pesados mediante las especies vegetales. Realizar un programa de monitoreo continuo para evaluar las concentraciones de mercurio en diferentes especies, esto permitirá un seguimiento de cualquier cambio en las concentraciones y ayudará a tomar decisiones informadas y recomendaciones para el uso de estas especies en la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio por la actividad minera.

Realizar un análisis detallado del suelo en las áreas donde crecen estas especies para comprender mejor la fuente de contaminación de mercurio y otros metales pesados que son perjudiciales para la biodiversidad, esto puede ayudar a identificar la causa subyacente de la acumulación de mercurio y guiar las estrategias de gestión.

Dado que la (*Kniphofia pauciflora* B.) ha evidenciado su capacidad de adsorción de mercurio, sería prudente contemplar la incorporación de dicha especie en iniciativas de fitorremediación con el propósito de mitigar la contaminación edáfica. Este enfoque conlleva la posibilidad de sembrar estas plantas en zonas afectadas por la presencia de mercurio, con el fin de contribuir a la remediación del suelo a lo largo del tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aghili, S., & Golzary, A. (2023). Greening the earth, healing the soil: A comprehensive life cycle assessment of phytoremediation for heavy metal contamination. *Environmental Technology and Innovation*, 32, 103241. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103241>
- Alajmi, R., Al-Shammari, M., Abdel-Gaber, R., Metwally, D., El-Khadragy, M. F., & Alrajeh, A. (2021). Effectiveness of naturally occurring *Aphis gossypii* on tomato plants as a bio-indicator for heavy metals in Riyadh and Hafar Al-Batin, Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(7), 4096–4101. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.027>
- Ali, M. M., Ali, M. L., Islam, M. S., & Rahman, M. Z. (2016). Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 5, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.002>
- Álvarez, M. L. (2019). *Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combinación de técnicas de fitorremediación con adición de biochar*. [Universidad Politécnica Madrid]. Recuperado de: <https://oa.upm.es/55865/>
- Alves, A. R. A., Yin, Q., Oliveira, R. S., Silva, E. F., & Novo, L. A. B. (2022). Plant growth-promoting bacteria in phytoremediation of metal-polluted soils: Current knowledge and future directions. *Science of the Total Environment*, 838(January). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156435>
- ANA, 2016. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales* (p. 59). Recuperado de : [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j.\\_010-2016-ana\\_0.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._010-2016-ana_0.pdf)
- Antoniadis, V., Shaheen, S. M., Stärk, H. J., Wennrich, R., Levizou, E., Merbach, I., & Rinklebe, J. (2021). Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil. *Environment International*, 146(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106233>
- Balzino, M., Seccatore, J., Marin, T., De Tomi, G., & Veiga, M. M. (2015). Gold losses

- and mercury recovery in artisanal gold mining on the Madeira River, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 102, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.012>
- Baragaño, D., Forján, R., Álvarez, N., Gallego, J. R., & González, A. (2022). Zero valent iron nanoparticles and organic fertilizer assisted phytoremediation in a mining soil: Arsenic and mercury accumulation and effects on the antioxidative system of *Medicago sativa* L. *Journal of Hazardous Materials*, 433(March). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128748>
- Berzas, J. J., Rodríguez, R. C., & Jiménez, M. (2009). Mercury speciation in the Valdezogues River-La Serena Reservoir system: Influence of Almadén (Spain) historic mining activities. *Science of the Total Environment*, 407(7), 2372–2382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.006>
- Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J. H. P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303(January). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Bortoloti, G. A., & Baron, D. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*, 8(December 2021), 100204. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100204>
- Brousett, M. A., Rondan-Sanabria, G. G., Chirinos-Marroquín, M., & Biamont-Rojas, I. (2021). Impacto de la Minería en Aguas Superficiales de la Región Puno - Perú. *Fides et Ratio - Revista de Difusión Cultural y Científica de La Universidad La Salle En Bolivia*, 21(21), 187–208. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-081X2021000100011&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.bo/pdf/rfer/v21n21/v21n21\\_a11.pdf](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2021000100011&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.bo/pdf/rfer/v21n21/v21n21_a11.pdf)
- Brutti, L., Beltrán, M., & García, I. (2018). *Biorremediación de los Recursos Naturales* (INTA (ed.); Primera Ed). Recuperado de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro\\_biorremediacion\\_de\\_los\\_recursos\\_naturales\\_2.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro_biorremediacion_de_los_recursos_naturales_2.pdf)
- Camacho, A., Reboloso, C., Van Brussel, E., Flores, R., Carrizales, L., & Díaz-Barriga,

- F. (2016). Impact of artisanal mining of mercury on the natural environment. *Toxicology Letters*, 259, S166–S167. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.07.396>
- Carrasco, S., Ortega, C., Sobrino, J., Barón, Á., Millán, R., & Hernández, L. E. (2023). Attenuation of mercury phytotoxicity with a high nutritional level of nitrate in alfalfa plants grown hydroponically. *Plant Stress*, 7(January). <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100131>
- Cazzaniga, S. G., Braat, L., van den Elsen, S., Lombaers, C., Visser, J., Obinu, L., Maciá-Vicente, J. G., Postma, J., Mommer, L., & Helder, J. (2023). Pinpointing the distinctive impacts of ten cover crop species on the resident and active fractions of the soil microbiome. *Applied Soil Ecology*, 190(May). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105012>
- Chanaka, C. U., Veksha, A., Giannis, A., Liang, Y. N., Lisak, G., Hu, X., & Lim, T. T. (2019). Insights into the speciation of heavy metals during pyrolysis of industrial sludge. *Science of the Total Environment*, 691, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.095>
- Chaves, I. R. (2016). Metodologías analíticas utilizadas actualmente para la determinación de mercurio en músculo de pescado. *Revista Pensamiento Actual*, 16(26), 113–122. <https://doi.org/10.15517/pa.v16i26.25187>
- Chen, J., Gao, Y. C., Guo, C., Wu, G. H., Chen, Y. C., & Lin, B. (2008). Facile synthesis of water-soluble and size-homogeneous cadmium selenide nanoparticles and their application as a long-wavelength fluorescent probe for detection of Hg(II) in aqueous solution. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 69(2), 572–579. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2007.05.005>
- Chen, X., Zheng, L., Sun, R., Liu, S., Li, C., Chen, Y., & Xu, Y. (2022). Mercury in sediment reflecting the intensive coal mining activities: Evidence from stable mercury isotopes and Bayesian mixing model analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234(December 2021), 113392. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113392>
- Cheng, D., Ni, Z., Liu, M., Shen, X., & Jia, Y. (2021). Determination of trace Cr, Ni, Hg, As, and Pb in the tipping paper and filters of cigarettes by monochromatic

- wavelength X-ray fluorescence spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 502(March), 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.004>
- Coelho, I. P., Santos, L. B. B. Dos, Kato Junior, W. H., Corsino, J., Cordeiro, K. W., Boeing, T., Coelho, J. M., Garcez, F. R., Garcez, W. S., de Andrade, S. F., & Figueiredo, P. de O. (2020). Chemical profile and gastroprotective effect of *Jatropha elliptica* (Pohl) Oken roots. *Fitoterapia*, 146(August). <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2020.104707>
- Colzi, I., Gonnelli, C., Bettarini, I., & Selvi, F. (2023). Polyploidy affects responses to Nickel in Ni-hyperaccumulating plants: Evidence from the model species *Odontarrhena bertolonii* (Brassicaceae). *Environmental and Experimental Botany*, 213(June), 105403. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105403>
- Cuentas, M., & Velarde, J. (2019). Uso de mercurio en la Rinconada - Puno. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(1), 27–34. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522019000100003](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000100003)
- Dahmani, H., Van Oort, F., Gélie, B., & Balabane, M. (2000). Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. *Environmental Pollution*, 109(2), 231–238. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00262-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00262-6)
- De Agostini, A., Caltagirone, C., Caredda, A., Ciatelli, A., Cogoni, A., Farci, D., Guarino, F., Garau, A., Labra, M., Lussu, M., Piano, D., Sanna, C., Tommasi, N., Vacca, A., & Cortis, P. (2020). Heavy metal tolerance of orchid populations growing on abandoned mine tailings: A case study in Sardinia Island (Italy). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189 (November 2019), 110018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110018>
- Di Cesare, A., Eckert, E. M., D'Urso, S., Bertoni, R., Gillan, D. C., Wattiez, R., & Corno, G. (2016). Co-occurrence of integrase 1, antibiotic and heavy metal resistance genes in municipal wastewater treatment plants. *Water Research*, 94, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.049>
- Dillis, C., Marshall, A. J., Webb, C. O., & Grote, M. N. (2018). Prolific fruit output by

- the invasive tree *Bellucia pentamera* Naudin (Melastomataceae) is enhanced by selective logging disturbance. *Biotropica*, 50(4), 598–605. <https://doi.org/10.1111/btp.12545>
- Dinh, T., Dobo, Z., & Kovacs, H. (2022). Phytomining of noble metals – A review. *Chemosphere*, 286(P3), 131805. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131805>
- Durán, P. A. (2010). Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana [Universidad de Barcelona]. In *Universitat de Barcelona*. Recuperado de: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/36122>
- Emam, M. M., Khattab, H., Morsy, A. A., Salama, K. H. A., & Mansour, M. M. F. (2020). Role of redox system in enhancement of phytoremediation capacity in plants. *Handbook of Bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions*, 165–193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00010-7>
- Espinoza, D. P. (2018). *Escalas de Contaminación por Mercurio y su Impacto Ambiental por la Minería, Provincia de Maynas – 2014* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. Recuperado de: <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2347>
- Fajardo, F., Olaya, T. L., & Calbi, M. (2020). *Flora de Bogotá: Cunoniaceae* (Vol. 21). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/352837902\\_Flora\\_de\\_Bogota\\_Cunoniaceae](https://www.researchgate.net/publication/352837902_Flora_de_Bogota_Cunoniaceae)
- Falcon, J. vanessa. (2017). Fitoextracción de metales pesados en suelo contaminado con *Zea mays* L. en la estación experimental el Mantaro - Junin en el año 2016 [Universidad Nacional del Centro del Perú]. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4611>
- Fernandez, H. B., Mullisaca, E., & Huanchi, L. E. (2022). *Level of soil contamination with arsenic and heavy metals in Tiquillaca (Peru)* Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Share-Adapt. 24(2), 131–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.18271/ria.2022.416>
- Fernández, R. (2019). Distribución espacial de la regeneración de *Weinmannia*

- lechleriana (Cunoniaceae) en un bosque montano del sector San Alberto, Parque Nacional Yanachaga-Chemillén (Perú). *Arnaldoa*, 26(1), 213–222. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26109>
- Ferro, J. (2015). Manual revisado de métodos útiles en el muestreo y análisis de la vegetación. *Ecovida*, 5(1), 139–186. Recuperado de: <http://www.bionica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Fuentes, A. F. (2014). *Sinopsis de las Cunoniaceae de Bolivia*. May. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/258820172\\_Sinopsis\\_de\\_las\\_Cunoniaceae\\_de\\_Bolivia](https://www.researchgate.net/publication/258820172_Sinopsis_de_las_Cunoniaceae_de_Bolivia)
- Glickman, M. E., Rao, S. R., & Schultz, M. R. (2014). False discovery rate control is a recommended alternative to Bonferroni-type adjustments in health studies. *Journal of Clinical Epidemiology*, 67(8), 850–857. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2014.03.012>
- Gómez, X., Bernal, M. P., Zárate, P. P., Álvarez-Robles, M. J., González, R., & Clemente, R. (2023). Thermal evaluation of plant biomass from the phytostabilisation of soils contaminated by potentially toxic elements. *Chemosphere*, 342(June), 140116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140116>
- Gonçalves, A. O., Marshall, B. G., Kaplan, R. J., Moreno-Chavez, J., & Veiga, M. M. (2017). Evidence of reduced mercury loss and increased use of cyanidation at gold processing centers in southern Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 165, 836–845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.097>
- Google, E. (n.d.). [Dirección de Google Maps para manejar desde Sandia, Perú hasta la quebrada San Blas, Yanahuaya]. Recuperado el 25 de octubre del 2023, de: <https://earth.google.com/web/?hl=es-419>
- Goyzueta, G., & Trigos, C. (2009). Riesgos de la salud pública en el centro poblado minero artesanal la rinconada (5200 msnm) en Puno, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública.*, 26(1), 41–44. Recuperado de: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-46342009000100008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342009000100008&lng=es&tlng=es)
- Griboff, J. (2018). *Transferencia de metales y metaloides a través de la cadena trófica y*

- su acumulación en organismos destinados a consumo humano. estudios de fitorremediación [Universidad Nacional de Córdoba]. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11086/15272>
- Gutiérrez, H., Marrugo, J., Díez, S., Morales, G., Montoya, L. J., & Jonathan, M. P. (2020). Distribution of chemical forms of mercury in sediments from abandoned ponds created during former gold mining operations in Colombia. *Chemosphere*, 258, 127319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127319>
- Habte, G., Hwang, I. M., Kim, J. S., Hong, J. H., Hong, Y. S., Choi, J. Y., Nho, E. Y., Jamila, N., Khan, N., & Kim, K. S. (2016). Elemental profiling and geographical differentiation of Ethiopian coffee samples through inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES), ICP-mass spectrometry (ICP-MS) and direct mercury analyzer (DMA). *Food Chemistry*, 212, 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.178>
- Hasimuna, O. J., Chibesa, M., Ellender, B. R., & Maulu, S. (2021). Variability of selected heavy metals in surface sediments and ecological risks in the Solwezi and Kifubwa Rivers, Northwestern province, Zambia. *Scientific African*, 12, e00822. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00822>
- Hedrich, R., Mueller, T. D., Becker, D., & Marten, I. (2018). Structure and Function of TPC1 Vacuole SV Channel Gains Shape. *Molecular Plant*, 11(6), 764–775. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2018.03.017>
- Helaoui, S., Boughattas, I., Mkhinini, M., Chebbi, L., Elkribi-Boukhris, S., Alphonse, V., Livet, A., Banni, M., & Bousserhine, N. (2023). Biochar amendment alleviates heavy metal phytotoxicity of *Medicago sativa* grown in polymetallic contaminated soil: Evaluation of metal uptake, plant response and soil properties. *Plant Stress*, 10(June), 100212. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100212>
- Jaimes, F., & Trelles, G. (2021). *Geología de los cuadrángulos de Sandia (hojas 29y1, 29y2, 29y3, 29y4) y San Ignacio (hoja 29z4)*. INGEMMET, Boletín Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1: 50 000) (Primera ed, Vol. 1). Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3115>
- Kagalkar, A. N., Jadhav, M. U., Bapat, V. A., & Govindwar, S. P. (2011).

- Phytodegradation of the triphenylmethane dye Malachite Green mediated by cell suspension cultures of *Blumea malcolmii* Hook. *Bioresource Technology*, 102(22), 10312–10318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.101>
- Kahangwa, C. A., Nahonyo, C. L., Sangu, G., & Nassary, E. K. (2021). Assessing phytoremediation potentials of selected plant species in restoration of environments contaminated by heavy metals in gold mining areas of Tanzania. *Heliyon*, 7(9), e07979. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07979>
- Kim, H., Yu, B., Li, X., Wong, K. E., Boerwinkle, E., Seidelmann, S. B., Levey, A. S., Rhee, E. P., Coresh, J., & Rebholz, C. M. (2022). Serum metabolomic signatures of plant-based diets and incident chronic kidney disease. *American Journal of Clinical Nutrition*, 116(1), 151–164. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac054>
- Kujawska, J., & Pawłowska, M. (2022). The effect of amendment addition drill cuttings on heavy metals accumulation in soils and plants: Experimental study and artificial network simulation. *Journal of Hazardous Materials*, 425(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127920>
- Kurniawan, S. B., Ramli, N. N., Said, N. S. M., Alias, J., Imron, M. F., Abdullah, S. R. S., Othman, A. R., Purwanti, I. F., & Hasan, H. A. (2022). Practical limitations of bioaugmentation in treating heavy metal contaminated soil and role of plant growth promoting bacteria in phytoremediation as a promising alternative approach. *Heliyon*, 8(4), e08995. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08995>
- Lange, K., Viklander, M., & Blecken, G. T. (2020). Effects of plant species and traits on metal treatment and phytoextraction in stormwater bioretention. *Journal of Environmental Management*, 276(September), 111282. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111282>
- Lee, S., Kim, J. H., Moon, H. B., Park, J., Choi, G., & Kim, S. (2023). Effects of mercury exposure on fetal body burden and its association with infant growth. *Environmental Research*, 217(November 2022), 114780. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114780>
- Leung, H. M., Wang, Z. W., Ye, Z. H., Yung, K. L., Peng, X. L., & Cheung, K. C. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of

- metal-contaminated soils: A review. *Pedosphere*, 23(5), 549–563.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60049-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60049-1)
- Li, P., Du, B., Chan, H. M., & Feng, X. (2015). Human inorganic mercury exposure, renal effects and possible pathways in Wanshan mercury mining area, China. *Environmental Research*, 140, 198–204.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.033>
- Lindsey, K. L., Jäger, A. K., & Van Staden, J. (1998). Effect of a seaweed concentrate on acclimatization of in vitro grown plantlets of *Kniphofia pauciflora* and *Scilla kraussi*. *South African Journal of Botany*, 64(4), 262–264. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30892-9](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30892-9)
- Liu, Z., Chen, B., Wang, L. ao, Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123138. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>
- Liu, Z., & Tran, K. Q. (2021). A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, 112821. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112821>
- Liu, Z., Wang, L. ao, Xu, J., Ding, S., Feng, X., & Xiao, H. (2017). Effects of different concentrations of mercury on accumulation of mercury by five plant species. *Ecological Engineering*, 106, 273–278.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.051>
- Llop, S., Ibarlucea, J., Sunyer, J., & Ballester, F. (2013). Estado actual sobre la exposición alimentaria al mercurio durante el embarazo y la infancia, y recomendaciones en salud pública. *Gaceta Sanitaria*, 27(3), 273–278.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2012.09.002>
- Luo, J., Cai, L., Qi, S., Wu, J., & Sophie Gu, X. (2018). Influence of direct and alternating current electric fields on efficiency promotion and leaching risk alleviation of chelator assisted phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 149(November 2017), 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.005>
- Luo, J., He, W., Wu, J., & Sophie Gu, X. (2019). Sensitivity of *Eucalyptus globulus* to red and blue light with different combinations and their influence on its efficacy for

- contaminated soil phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 241(November 2018), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.045>
- Luo, J., Qi, S., Peng, L., & Xie, X. (2017). Enhanced phytoremediation capacity of a mixed-species plantation of Eucalyptus globulus and Chickpeas. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.006>
- Mahajan, P., & Kaushal, J. (2018). Role of Phytoremediation in Reducing Cadmium Toxicity in Soil and Water. *Journal of Toxicology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4864365>
- Makarova, A., Nikulina, E., Tsirulnikova, N., Avdeenkova, T., & Pishchaeva, K. V. (2021). Potential of S-containing and P-containing complexones in improving phytoextraction of mercury by Trifolium repens L. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 3037–3048. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.045>
- Makarova, A., Nikulina, E., Tsirulnikova, N., Pishchaeva, K., & Fedoseev, A. (2022). Effect of monoethanolamine salt-containing dicarboxylic acid and plant growth regulators on the absorption and accumulation of mercury. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3448–3455. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.035>
- Mantey, J., Nyarko, K. B., Owusu-Nimo, F., Awua, K. A., Bempah, C. K., Amankwah, R. K., Akatu, W. E., & Appiah-Effah, E. (2020). Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). *Heliyon*, 6(6), e04312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312>
- Marrugo, J., Durango, J., Pinedo, J., Olivero, J., & Díez, S. (2015). Phytoremediation of mercury-contaminated soils by Jatropha curcas. *Chemosphere*, 127, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.073>
- Marrugo, J., Marrugo, S., Pinedo, J., Durango, J., & Díez, S. (2016). Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. *Science of the Total Environment*, 542, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.117>
- Marrugo, S., Turull, M., Montes, G. E., Pico, M. V., Marrugo, J. L., & Díez, S. (2020). Phytoremediation of mercury in soils impacted by gold mining: A case-study of

- Colombia. *Bioremediation for Environmental Sustainability: Toxicity, Mechanisms of Contaminants Degradation, Detoxification and Challenges*, 145–160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00007-9>
- Mason, R. P., Baumann, Z., Hansen, G., Yao, K. M., Coulibaly, M., & Coulibaly, S. (2019). An assessment of the impact of artisanal and commercial gold mining on mercury and methylmercury levels in the environment and fish in Cote d'Ivoire. *Science of the Total Environment*, 665, 1158–1167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.393>
- McAlister, B. G., & Van Staden, J. (1996). In vitro propagation of *Kniphofia pauciflora* Bak. for conservation purposes. *South African Journal of Botany*, 62(4), 219–221. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30639-6](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30639-6)
- McDermott, S., Bao, W., Marjorie Aelion, C., Cai, B., & Lawson, A. (2012). When are fetuses and young children most susceptible to soil metal concentrations of arsenic, lead and mercury? *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 3(3), 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2012.05.001>
- Mei, W., Sun, H., Song, M., Jiang, L., Li, Y., Lu, W., Ying, G. G., Luo, C., & Zhang, G. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the soil–plant system: Sorption, root uptake, and translocation. *Environment International*, 156(May), 106642. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106642>
- Mello, I. S., Targanski, S., Pietro-Souza, W., Frutuoso Stachack, F. F., Terezo, A. J., & Soares, M. A. (2020). Endophytic bacteria stimulate mercury phytoremediation by modulating its bioaccumulation and volatilization. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202(May), 110818. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110818>
- MINAM. (2010). Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales. *Dirección General de Calidad Ambiental*, 1, 4–117. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-evaluacion-riesgos-ambientales>
- MINAM, 2014. (2014a). Guía para el muestreo de suelos. In Dirección General de Calidad Ambiental (Ed.), *Minam* (Primera ed). MINISTERIO DEL AMBIENTE. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA->

PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf

- MINAM, 2014. (2014b). Guía para muestreo de suelos. In *Ministerio del Ambiente*. Dirección General de Calidad Ambiental. Recuperado de: [http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO\\_MINAM1.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf)
- MINAM, 2017. (2017). Aprueban Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. In *El Peruano* (pp. 6–9). El Peruano. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Minbashi, M., Alimoradi, J., Nezam Abadi, N., Veisi, M., & Fernández-Aparicio, M. (2023). Screening candidate plant species as trap and catch crops for the control of broomrape (*Phelipanche mutelii*) in rapeseed (*Brassica napus*). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *xxxx*. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.08.002>
- Miranda, T. B., & Fuentes, A. F. (2015). *Avances en el estudio de hibridación en Weinmannia L. (Cunoniaceae) para Bolivia. March*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/273489095\\_Avances\\_en\\_el\\_estudio\\_de\\_hibridacion\\_en\\_Weinmannia\\_L\\_Cunoniaceae\\_para\\_Bolivia](https://www.researchgate.net/publication/273489095_Avances_en_el_estudio_de_hibridacion_en_Weinmannia_L_Cunoniaceae_para_Bolivia)
- Morales, J. F. (2010). Sinopsis del género *Weinmannia* (Cunoniaceae) en México y centroamérica. *Anales Del Jardin Botanico de Madrid*, *67*(2), 137–155. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2247>
- Morosini, C., Terzaghi, E., Raspa, G., Zanardini, E., Anelli, S., Armiraglio, S., Petranich, E., Covelli, S., & Di Guardo, A. (2021). Mercury vertical and horizontal concentrations in agricultural soils of a historically contaminated site: Role of soil properties, chemical loading, and cultivated plant species in driving its mobility. *Environmental Pollution*, *285*(June), 117467. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117467>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2004). Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. In El país (Ed.), *Journal of Obstetrics and Gynaecology* (Primera ed, Vol. 24, Issue 5). Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR) Las. <https://doi.org/10.1080/01443610410001722590>

- Mtemi, W. M., Liu, S., Liu, K., Wei, L., Wang, X., Jiang, A., & Goodale, E. (2023). Concentrations and biomagnification of multiple metals / metalloids are higher in rice than in sugarcane agroecosystems of southern China. *Ecological Indicators*, 150(February), 110266. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110266>
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., & Gamarra, G. (2018). Phytoremediation with corn (*Zea mays* L.) and Stevia compost on soils degraded by contamination with heavy metals. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551–560. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>
- Muñoz, N. C., González-Álvarez, D., Jaramillo, A. C., Soto-Ospina, A., & Ruiz, Á. A. (2023). Toxicological risk in individuals exposed to methylmercury and total mercury through daily-consumed foodstuffs in one of the mining regions of Bajo Cauca, Antioquia, Colombia. *Emerging Contaminants*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100226>
- Mupambwa, H. A., Hanghome, M., Chikwililwa, C., Hausiku-Ikechukwu, M., Kasita, N., Haindongo, T. P., Handura, B., DeKerk, J., Kharuxab, S., Mafwila, S. K., & Iitembu, J. A. (2023). A 2-year study on the spatio-temporal changes in trace metal concentrations in sediment, water and plants within the Walvis Bay Lagoon, Namibia. *Scientific African*, 21, e01787. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01787>
- Mwelwa, S., Chungu, D., Tailoka, F., Beesigamukama, D., & Tanga, C. (2023). Biotransfer of heavy metals along the soil-plant-edible insect-human food chain in Africa. *Science of the Total Environment*, 881(December 2022), 163150. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163150>
- Nair, S. V., Kotnik, J., Gačnik, J., Živković, I., Koenig, A. M., Mlakar, T. L., & Horvat, M. (2022). Dispersion of airborne mercury species emitted from the cement plant. *Environmental Pollution*, 312(May), 120057. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120057>
- Ñaupas, H., Mejia, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la Investigación* (A. G. M (ed.); 4ta. Edici). Ediciones de la U. Recuperado de: <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/B0028.pdf>
- Naveed, S., Oladoye, P. O., & Alli, Y. A. (2023). Toxic heavy metals: A bibliographic

- review of risk assessment, toxicity, and phytoremediation technology. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2(March), 100018. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100018>
- Nebeská, D., Trögl, J., Ševců, A., Špánek, R., Marková, K., Davis, L., Burdová, H., & Pidlisnyuk, V. (2021). *Miscanthus x giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224(July). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630>
- Negrazis, L., Kidd, K. A., Erdozain, M., Emilson, E. J. S., Mitchell, C. P. J., & Gray, M. A. (2022). Effects of forest management on mercury bioaccumulation and biomagnification along the river continuum. *Environmental Pollution*, 310(August), 119810. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119810>
- Nsenga, M., Zhu, B., Moore, M. T., Wang, T., & Li, X. (2021). Can vegetated drainage ditches be effective in a similar way as constructed wetlands? Heavy metal and nutrient standing stock by ditch plant species. *Ecological Engineering*, 166(March), 106234. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106234>
- Ojuederie, O. B., & Babalola, O. O. (2017). Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>
- Orozco, D. M., Letechipía, C., Megchún, J. V., & Gómez, A. (2022). *Determinación de los factores de bioconcentración , traslocación y riesgos potenciales a la salud en Capsicum annuum L . March*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/359195915%0ADeterminación>
- Ottenbros, I. B., Boerleider, R. Z., Jubitana, B., Roeleveld, N., & Scheepers, P. T. J. (2019a). Knowledge and awareness of health effects related to the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in Suriname. *Environment International*, 122(October 2018), 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.059>
- Ottenbros, I. B., Boerleider, R. Z., Jubitana, B., Roeleveld, N., & Scheepers, P. T. J. (2019b). Knowledge and awareness of health effects related to the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in Suriname. *Environment International*,

- 122(July 2018), 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.059>
- Owusu, O., Bansah, K. J., & Mensah, A. K. (2019). “Small in size, but big in impact”: Socio-environmental reforms for sustainable artisanal and small-scale mining. *Journal of Sustainable Mining*, 18(1), 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.02.001>
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. Recuperado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Pelaez, A. I., Lores, I., Sotres, A., Mendez-Garcia, C., Fernandez-Velarde, C., Santos, J. A., Gallego, J. L. R., & Sanchez, J. (2013). Design and field-scale implementation of an “on site” bioremediation treatment in PAH-polluted soil. *Environmental Pollution*, 181, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.004>
- Pelcová, P., Ridošková, A., Hrachovinová, J., & Grmela, J. (2021). Evaluation of mercury bioavailability to vegetables in the vicinity of cinnabar mine. *Environmental Pollution*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117092>
- Peña, M. S., & Eddie, Z. N. (2017). *La Química en la Educación Superior* (Primera Ed, Issue March 2017). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/341700122\\_LIBRO\\_Quimica\\_en\\_la\\_Educacion\\_Superior](https://www.researchgate.net/publication/341700122_LIBRO_Quimica_en_la_Educacion_Superior)
- Pietrini, I., Grifoni, M., Franchi, E., Cardaci, A., Pedron, F., Barbaferi, M., Petruzzelli, G., & Vocciante, M. (2021). Enhanced lead phytoextraction by endophytes from indigenous plants. *Soil Systems*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030055>
- Qian, X., Wu, Y., Zhou, H., Xu, X., Xu, Z., Shang, L., & Qiu, G. (2018). Total mercury and methylmercury accumulation in wild plants grown at wastelands composed of mine tailings: Insights into potential candidates for phytoremediation. *Environmental Pollution*, 239, 757–767. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.105>
- Quarm, J. A., Anning, A. K., Fei-Baffoe, B., Siaw, V. F., & Amuah, E. E. Y. (2022).

- Perception of the environmental, socio-economic and health impacts of artisanal gold mining in the Amansie West District, Ghana. *Environmental Challenges*, 9(November), 100653. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100653>
- Ramirez, V. L. (2019). *Bacillus cereus* MH778713 asiste a la fitorremediación a *Prosopis laevigata* mediante la producción de compuestos orgánicos volátiles [Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/4731>
- Rees, F., Sterckeman, T., & Morel, J. L. (2020). Biochar-assisted phytoextraction of Cd and Zn by *Noccaea caerulescens* on a contaminated soil: A four-year lysimeter study. *Science of the Total Environment*, 707, 135654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135654>
- Rodríguez, S. M. (2018). *Bioacumulación de metales pesados en schoenoplectus californicus (Cyperaceae) de las áreas bentónicas en dos estaciones climáticas: El caso de estudio del Lago San Pablo. Imbabura-Ecuador* [Universidad de Sevilla]. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=216495>
- Rosas, I. A. (2008). *Fitoextracción de metales pesados presentes en sedimentos contaminados utilizando Eucalyptus globulus*. [Universidad de los Andes]. Recuperado de: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9946/u336396.pdf?sequence=1>
- Rosas, J., Walker, C., Duffy, K., Krüger, C., Krüger, M., Robinson, C. H., & Pittman, J. K. (2023). Isolation and identification of arbuscular mycorrhizal fungi from an abandoned uranium mine and their role in soil-to-plant transfer of radionuclides and metals. *Science of the Total Environment*, 876(January). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162781>
- Ruiz, A., Carrillo, R., González, M. del C. A., & Soto, R. M. (2013). Potential of castor bean (*Ricinus communis* L.) for phytoremediation of mine tailings and oil production. *Journal of Environmental Management*, 114, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.023>
- Sardans, J., Montes, F., & Peñuelas, J. (2010). Determination of As, Cd, Cu, Hg and Pb

- in biological samples by modern electrothermal atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 65(2), 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2009.11.009>
- SENAMHI. (2022). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología*. 2022a. Recuperado de: <https://www.gob.pe/senamhi>
- Shahrukh, S., Hossain, S. A., Huda, M. N., Moniruzzaman, M., Islam, M. M., Shaikh, M. A. A., & Hossain, M. E. (2023). Air pollution tolerance, anticipated performance, and metal accumulation indices of four evergreen tree species in Dhaka, Bangladesh. *Current Plant Biology*, 35–36(September), 100296. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2023.100296>
- Sharma, B. M., Sánka, O., Kalina, J., & Scheringer, M. (2019). An overview of worldwide and regional time trends in total mercury levels in human blood and breast milk from 1966 to 2015 and their associations with health effects. *Environment International*, 125(February), 300–319. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.016>
- Sharma, P., Tripathi, S., Sirohi, R., Kim, S. H., Ngo, H. H., & Pandey, A. (2021). Uptake and mobilization of heavy metals through phytoremediation process from native plants species growing on complex pollutants: Antioxidant enzymes and photosynthetic pigments response. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101629. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101629>
- Sierra, D., Bartolomé, S., & Torre, D. (2018). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales Ejemplares singulares de Eucalyptus cladocalyx F . 44(1)*, 11–22. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/326662043\\_Ejemplares\\_singulares\\_de\\_Eucalyptus\\_cladocalyx\\_F\\_Muell\\_testigos\\_del\\_arboreto\\_historico\\_de\\_Sierra\\_Cabell\\_o\\_San\\_Bartolome\\_de\\_la\\_Torre\\_Huelva](https://www.researchgate.net/publication/326662043_Ejemplares_singulares_de_Eucalyptus_cladocalyx_F_Muell_testigos_del_arboreto_historico_de_Sierra_Cabell_o_San_Bartolome_de_la_Torre_Huelva)
- Sitarska, M., Traczewska, T., Filarowska, W., Holtra, A., Zamorska-Wojdyła, D., & Hanus-Lorenz, B. (2023). Phytoremediation of mercury from water by monocultures and mixed cultures pleustophytes. *Journal of Water Process Engineering*, 52(January). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103529>
- Solfiyeni, Syamsuardi, Chairul, & Mukhtar, E. (2022). Impacts of invasive tree species

- Bellucia pentamera on plant diversity, microclimate and soil of secondary tropical forest in West Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 23(6), 3135–3146. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230641>
- Song, Y., Kirkwood, N., Maksimović, Č., Zhen, X., O'Connor, D., Jin, Y., & Hou, D. (2019). Nature based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: A review. *Science of the Total Environment*, 663, 568–579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.347>
- Speranza, F. C., Badinier, C., & Cosimi, L. (2020). *Guía de aptitud de especies forestales en yungas*. Recuperado de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/guia\\_de\\_aptitud\\_de\\_especies\\_forestales\\_en\\_yungas.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/guia_de_aptitud_de_especies_forestales_en_yungas.pdf)
- Stammel, B., Damm, C., Fischer-Bedtke, C., Rumm, A., Gelhaus, M., Horchler, P., Kunder, S., Foeckler, F., & Scholz, M. (2022). Florix, an index to assess plant species in floodplains for nature conservation – Developed and tested along the river Danube. *Ecological Indicators*, 145(August), 109685. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109685>
- Stylianou, M., Gavriel, I., Vogiatzakis, I. N., Zorpas, A., & Agapiou, A. (2020). Native plants for the remediation of abandoned sulphide mines in Cyprus: A preliminary assessment. *Journal of Environmental Management*, 274(August), 110531. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110531>
- Subramanian, D., Subha, R., & Murugesan, A. K. (2022). Accumulation and translocation of trace elements and macronutrients in different plant species across five study sites. *Ecological Indicators*, 135(August 2021), 108522. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108522>
- Teixeira, R. A., Pereira, W. V. da S., Souza, E. S. de, Ramos, S. J., Dias, Y. N., Lima, M. W. de, de Souza Neto, H. F., Oliveira, E. S. de, & Fernandes, A. R. (2021). Artisanal gold mining in the eastern Amazon: Environmental and human health risks of mercury from different mining methods. *Chemosphere*, 284(June), 131220. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131220>
- Tiziani, R., Pranter, M., Valentinuzzi, F., Pii, Y., Luigimaria, B., Cesco, S., & Mimmo,

- T. (2023). Unraveling plant adaptation to single and combined nutrient deficiencies in a dicotyledonous and a monocotyledonous plant species. *Plant Science*, 335(July), 111793. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111793>
- Tong, M., Yu, J., Liu, M., Li, Z., Wang, L., Yin, C., Ren, A., Chen, L., & Jin, L. (2021). Total mercury concentration in placental tissue, a good biomarker of prenatal mercury exposure, is associated with risk for neural tube defects in offspring. *Environment International*, 150, 106425. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106425>
- Velásquez, M. G., Vega, C. M., Gomringer, R. C., Pillaca, M., Thomas, E., Stewart, P. M., Gamarra Miranda, L. A., Dañobeytia, F. R., Guerrero Barrantes, J. A., Gushiken, M. C., Bardales, J. V., Silman, M., Fernandez, L., Ascorra, C., & Torres, D. del C. (2021). Mercury in soils impacted by alluvial gold mining in the Peruvian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 288(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112364>
- Vicente, C., Frontino, J., Alves, D., De Castro, A. P., & Veronesi, F. (2020). Is mercury in fluorescent lamps the only risk to human health? A study of environmental mobility of toxic metals and human health risk assessment. *Chemosphere*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128107>
- Vigil, M. Á. (2017). *Sistema de ayuda a la decisión para el diseño de proyectos de fitorremediación de suelos industriales* [Universidad de Oviedo]. Recuperado de: [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/43858/6/TD\\_MiguelAngelVigilBerrrocal-1.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/43858/6/TD_MiguelAngelVigilBerrrocal-1.pdf)
- Vishnupradeep, R., Bruno, L. B., Taj, Z., Karthik, C., Challabathula, D., Tripti, Kumar, A., Freitas, H., & Rajkumar, M. (2022). Plant growth promoting bacteria improve growth and phytostabilization potential of *Zea mays* under chromium and drought stress by altering photosynthetic and antioxidant responses. *Environmental Technology and Innovation*, 25, 102154. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102154>
- Waack, A., Ranabothu, M., & Vattipally, V. (2023). Mercury poisoning from artisanal gold mining equipment. *Radiology Case Reports*, 18(2), 607–609. <https://doi.org/10.1016/j.radcr.2022.10.099>

- Wang, J., Anderson, C. W. N., Xing, Y., Fan, Y., Xia, J., Shaheen, S. M., Rinklebe, J., & Feng, X. (2018). Thiosulphate-induced phytoextraction of mercury in *Brassica juncea*: Spectroscopic investigations to define a mechanism for Hg uptake. *Environmental Pollution*, 242, 986–993. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.065>
- Wang, Q., Li, Z., Feng, X., Li, X., Wang, D., Sun, G., & Peng, H. (2020). Vegetable *Houttuynia cordata* Thunb. as an important human mercury exposure route in Kaiyang county, Guizhou province, SW China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 197(April), 110575. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110575>
- Wei, Y., Peng, X., Wang, X., & Wang, C. (2023). The heavy metal-associated isoprenylated plant protein (HIPP) gene family plays a crucial role in cadmium resistance and accumulation in the tea plant (*Camellia sinensis* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 260(May), 115077. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115077>
- Xun, Y., Feng, L., Li, Y., & Dong, H. (2017). Mercury accumulation plant *Cyrtomium macrophyllum* and its potential for phytoremediation of mercury polluted sites. *Chemosphere*, 189, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.055>
- Yang, H., Pan, C., Wu, Y., Qing, S., Wang, Z., & Wang, D. (2023). Response of understory plant species richness and tree regeneration to thinning in *Pinus tabuliformis* plantations in northern China. *Forest Ecosystems*, 10(March), 100105. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100105>
- Yevugah, L. L., Darko, G., & Bak, J. (2021). Does mercury emission from small-scale gold mining cause widespread soil pollution in Ghana? *Environmental Pollution*, 284, 116945. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116945>
- Yinebeb, M., Lulekal, E., Bekele, T., & Lemessa, D. (2022). Homegardens plant species richness and their use types have positive associations across agricultural landscapes of Northwest Ethiopia. *Global Ecology and Conservation*, 40(June), e02342. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02342>
- Zantis, L. J., Rombach, A., Adamczyk, S., Velmala, S. M., Adamczyk, B., Vijver, M. G., Peijnenburg, W., & Bosker, T. (2023). Species-dependent responses of crop plants

- to polystyrene microplastics. *Environmental Pollution*, 335(July), 122243. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122243>
- Zárate, R. H., Custodio, M., Orellana, E., Cuadrado, W. J., Grijalva, P. L., & Peñaloza, R. (2021). Determination of toxic metals in commonly consumed medicinal plants largely used in Peru by ICP-MS and their impact on human health. *Chemical Data Collections*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2021.100711>
- Zhang, C., Gan, C., Ding, L., Xiong, M., Zhang, A., & Li, P. (2020). Maternal inorganic mercury exposure and renal effects in the Wanshan mercury mining area, southwest China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189(September), 109987. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109987>
- Zhang, Q., Kong, W., Wei, L., Wang, Y., Luo, Y., Wang, P., Liu, J., Schnoor, J. L., & Jiang, G. (2020). Uptake, phytovolatilization, and interconversion of 2,4-dibromophenol and 2,4-dibromoanisole in rice plants. *Environment International*, 142(June), 105888. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105888>
- Zhang, T., Wang, X., Luo, Z., Liu, J., Chen, Y., & Fan, P. (2023). *Ecotoxicology and Environmental Safety Maternal blood concentrations of toxic metal (loid) s and trace elements from preconception to pregnancy and transplacental passage to fetuses*. 264(August). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115394>
- Zhao, F., Bin Yang, Zhu, X., Ma, S., Xie, E., Zeng, H., Li, C., & Wu, J. (2023). An increase in intercropped species richness improves plant water use but weakens the nutrient status of both intercropped plants and soil in rubber–tea agroforestry systems. *Agricultural Water Management*, 284(May), 108353. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108353>
- Zhu, X., Blanco, E., Bhatti, M., & Borrión, A. (2020). Transitional dynamics from mercury to cyanide-based processing in artisanal and small- scale gold mining: Social, economic, geochemical, and environmental considerations. *Science of the Total Environment*, 143747. <https://doi.org/10.1016/j.jhepr.2023.100756>
- Zunaidi, A. A., Lim, L. H., & Metali, F. (2023). Comparative assessment of the heavy metal phytoextraction potential of vegetables from agricultural soils: A field experiment. *Heliyon*, 9(2), e13547. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13547>



## ANEXOS

## Anexo 1. D.S. N° 011-2017 MINAM (ECA)

12

NORMAS LEGALES

Sábado 2 de diciembre de 2017 / El Peruano

Que, de conformidad con lo previsto en el artículo 14 del Reglamento que establece disposiciones relativas a la Publicidad, Publicación de Proyectos Normativos y Difusión de Normas Legales de Carácter General, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2009-JUS, y el artículo 39 del Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la Información Pública Ambiental y Participación y Consulta Ciudadana en Asuntos Ambientales, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM; corresponde disponer la publicación de la propuesta de metodología en el Diario Oficial El Peruano, antes de la fecha prevista para su entrada en vigencia, con la finalidad de permitir a las personas interesadas formular los comentarios y aportes respectivos;

Con los vistos de la Secretaría General, la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos, la Oficina de Asesoría Jurídica, y en uso de las facultades conferidas en la Ley de Recursos Hídricos, el Reglamento de Organización y Funciones de esta autoridad, aprobado por Decreto Supremo N° 06-2010-AG, y modificado por Decreto Supremo N° 012-2016-MINAGRI;

SE RESUELVE:

**Artículo 1.-** Dispóngase la publicación de la presente resolución en el Diario Oficial El Peruano y del documento denominado "Metodología para la determinación del Índice de calidad de agua para los recursos hídricos superficiales en el Perú ICA-PE", en el portal web de la Autoridad Nacional del Agua: [www.ana.gob.pe](http://www.ana.gob.pe), por el plazo de quince (15) días hábiles, a fin que los interesados remitan sus opiniones y sugerencias a la dirección electrónica siguiente: [IndiceCalidadAgua@ana.gob.pe](mailto:IndiceCalidadAgua@ana.gob.pe).

**Artículo 2.-** Encargar a la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos, la recepción y análisis de los aportes y comentarios que se presenten respecto al documento citado en el artículo precedente.

Regístrese, comuníquese y publíquese,

ABELARDO DE LA TORRE VILLANUEVA  
Jefe  
Autoridad Nacional del Agua

1593024-1

### AMBIENTE

#### Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

DECRETO SUPREMO  
N° 011-2017-MINAM

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el numeral 22 del artículo 2 de la Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida;

Que, de acuerdo con lo establecido en el artículo 3 de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, en adelante la Ley, el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, entre otros, las normas que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en la Ley;

Que, el numeral 31.1 del artículo 31 de la Ley define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente; asimismo, el numeral 31.2 del artículo 31 de la Ley establece que el ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas, así como un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental;

Que, según lo dispuesto en el numeral 33.1 del artículo 33 de la Ley, la Autoridad Ambiental Nacional dirige el proceso de elaboración y revisión de ECA y, en coordinación con los sectores correspondientes, elabora o encarga las propuestas de ECA, las que serán remitidas a la Presidencia del Consejo de Ministros para su aprobación mediante decreto supremo;

Que, en virtud a lo dispuesto por el numeral 33.4 del artículo 33 de la Ley, en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplica el principio de gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, de conformidad con el literal d) del artículo 7 del Decreto Legislativo N° 1013, que aprueba la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente, esta entidad tiene como función específica elaborar los ECA, los cuales deberán contar con la opinión del sector correspondiente y ser aprobados mediante decreto supremo;

Que, mediante Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM se aprueban los ECA para Suelo y, a través del Decreto Supremo N° 002-2014-MINAM se aprueban las disposiciones complementarias para su aplicación;

Que, asimismo, mediante Decreto Supremo N° 013-2015-MINAM se dictan las reglas para la presentación y evaluación del Informe de Identificación de Sitios Contaminados;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 331-2016-MINAM se crea el Grupo de Trabajo encargado

DIARIO OFICIAL DEL BICENTENARIO

# El Peruano

## REQUISITO PARA PUBLICACIÓN DE NORMAS LEGALES Y SENTENCIAS

Se comunica a las entidades que conforman el Poder Legislativo, Poder Ejecutivo, Poder Judicial, Organismos constitucionales autónomos, Organismos Públicos, Gobiernos Regionales y Gobiernos Locales, que para efectos de la publicación de sus disposiciones en general (normas legales, reglamentos jurídicos o administrativos, resoluciones administrativas, actos de administración, actos administrativos, etc) con o sin anexos, que contengan más de una página, se adjuntará un CD o USB en formato Word con su contenido o éste podrá ser remitido al correo electrónico [normaslegales@editoraperu.com.pe](mailto:normaslegales@editoraperu.com.pe).

LA DIRECCIÓN

ANEXO  
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA SUELO

Parámetros en mg/kg PS <sup>(2)</sup>	Usos del Suelo <sup>(1)</sup>			Métodos de ensayo <sup>(7) y (8)</sup>
	Suelo Agrícola <sup>(3)</sup>	Suelo Residencial/ Parques <sup>(4)</sup>	Suelo Comercial <sup>(5)/ Industrial/ Extractivo<sup>(6)</sup></sup>	
<b>ORGÁNICOS</b>				
<b>Hidrocarburos aromáticos volátiles</b>				
Benceno	0,03	0,03	0,03	EPA 8260 <sup>(9)</sup> EPA 8021
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos <sup>(10)</sup>	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
<b>Hidrocarburos poliaromáticos</b>				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
<b>Hidrocarburos de Petróleo</b>				
Fracción de hidrocarburos F1 <sup>(11)</sup> (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 <sup>(12)</sup> (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 <sup>(13)</sup> (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
<b>Compuestos Organoclorados</b>				
Bifenilos policlorados - PCB <sup>(14)</sup>	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260
<b>INORGÁNICOS</b>				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total <sup>(15)</sup>	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN 15192 <sup>(16)</sup>
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/ó ISO 17690:2015

Notas:

[\*\*] Este símbolo dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para el uso de suelo agrícola.

(1) **Suelo:** Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

(2) **PS:** Peso seco.

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

(4) **Suelo residencial/parques:** Suelo ocupado por la población para construir sus viviendas, incluyendo áreas verdes y espacios destinados a actividades de recreación y de esparcimiento.

(5) **Suelo comercial:** Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla está relacionada con operaciones comerciales y de servicios.

(6) **Suelo industrial/extractivo:** Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y/o, la elaboración, transformación o construcción de bienes.

(7) Métodos de ensayo estandarizados vigentes o métodos validados y que cuenten con la acreditación nacional e internacional correspondiente, en el marco del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de la *International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)*. Los métodos de ensayo deben contar con límites de cuantificación que estén por debajo del ECA

Anexo 2. Informe de análisis de (Hg) por (DMA) – 80 EVO



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



**INFORME DE ANÁLISIS**  
**N°07 -LA136**

**ASUNTO:** Análisis del metal Mercurio (Hg) por analizador de mercurio directo DMA – 80 EVO  
**PROCEDENCIA:** Distrito de Yanahuaya – Provincia de Sandia  
**TESIS:** CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES *Bellucia Pentámera* N., *Kniphofia Pauciflora* B. y *Weinmannia Sp. L.* DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023  
**TELEFONO:** cel. 994366448

**CODIGO DE LABORATORIO:** L01LA136  
**N° ORDEN:** LMEA – 4210 – MP – AES  
**FECHA DE INGRESO:** 04/04/2023  
**TIPO DE SERVICIO:** Único  
**TESISTA EN DOCTORADO:** Wilber Pastor Contreras

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA**

**EMPAQUE PRIMARIO:** bolsa de ziploc  
**TIPO DE MUESTRA:** Suelo y Biotas  
**DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE:** Análisis de Mercurio (Hg)  
**CANTIDAD DE MUESTRAS:** 12

**TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:**  Ambiente  
 Refrigeración  
**FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:** 05/04/2023

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Punto Muestreo	CODIGO	Coordenadas			RESULTADOS (ppm)	Método de análisis
		ESTE	NORTE	ALTITUD		
PUNTO 01	SUELO	485 625	9 402 631	3 398	16.25	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				11.02	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				10.07	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				4.08	D-7623-10 de ASTM
	SUELO	485 627	8 402 627	3 400	2.94	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				0.66	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				0.31	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				1.93	D-7623-10 de ASTM
	SUELO	485 626	9 402 633	3 396	1.31	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				0.28	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				0.24	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				0.16	D-7623-10 de ASTM



Dr. Sc. Fael Huisa Mamani  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO  
Y EVALUACIÓN AMBIENTAL - FIM UNA

*Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio*



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



**INFORME DE ANÁLISIS**  
**N°08 -LA136**

**ASUNTO:** Análisis del metal Mercurio (Hg) por analizador de mercurio directo DMA – 80 EVO  
**PROCEDENCIA:** Distrito de Yanahuaya – Provincia de Sandia  
**TESIS:** CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES *Bellucia Pentámera* N., *Kniphofia Pauciflora* B. y *Weinmannia Sp. L.* DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023  
**TELEFONO:** cel. 994366448

**CODIGO DE LABORATORIO:** L01LA136  
**N° ORDEN:** LMEA – 4210 – MP – AES  
**FECHA DE INGRESO:** 04/04/2023  
**TIPO DE SERVICIO:** Único  
**TESISTA EN DOCTORADO:** Wilber Pastor Contreras

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA**

**EMPAQUE PRIMARIO:** bolsa de ziploc  
**TIPO DE MUESTRA:** Suelo y Biotas  
**DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE:** Análisis de Mercurio (Hg)  
**CANTIDAD DE MUESTRAS:** 12

**TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:**  Ambiente  
 Refrigeración  
**FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:** 05/04/2023

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Punto Muestreo	CODIGO	Coordenadas			RESULTADOS (ppm)	Método de análisis
		ESTE	NORTE	ALTITUD		
PUNTO 02	SUELO	485 441	8 402 809	3 258	16.35	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				12.99	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				9.10	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				4.91	D-7623-10 de ASTM
	SUELO	485 443	8 402 811	3 257	1.60	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				1.33	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				0.22	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				0.16	D-7623-10 de ASTM
	SUELO	485 438	8 402 806	3 260	1.72	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				0.48	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				0.22	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				0.17	D-7623-10 de ASTM



*(Firma manuscrita)*  
M.Sc. Fidel Huisa Mamani  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO  
Y EVALUACIÓN AMBIENTAL - FIM UNA

*Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio*



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



**INFORME DE ANÁLISIS**

**N°09-LA136**

<p><b>ASUNTO:</b> Análisis del metal Mercurio (Hg) por analizador de mercurio directo DMA – 80 EVO</p> <p><b>PROCEDENCIA:</b> Distrito de Yanahuaya – Provincia de Sandia</p> <p><b>TESIS:</b> CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES <i>Bellucia Pentámera N.</i>, <i>Kniphofia Pauciflora B.</i> y <i>Weinmannia Sp. L.</i> DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023</p> <p><b>TELEFONO:</b> cel. 994366448</p>	<p><b>CODIGO DE LABORATORIO:</b> L01LA136</p> <p><b>N° ORDEN:</b> LMEA – 4210 – MP – AES</p> <p><b>FECHA DE INGRESO:</b> 04/04/2023</p> <p><b>TIPO DE SERVICIO:</b> Único</p> <p><b>TESISTA EN DOCTORADO:</b> Wilber Pastor Contreras</p>
--	---

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA**

<p><b>EMPAQUE PRIMARIO:</b> bolsa de ziploc</p> <p><b>TIPO DE MUESTRA:</b> Suelo y Biotas</p> <p><b>DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE:</b> Análisis de Mercurio (Hg)</p> <p><b>CANTIDAD DE MUESTRAS:</b> 12</p>	<p><b>TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Refrigeración</p> <p><b>FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:</b> 05/04/2023</p>
---	---

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Punto Muestreo	CODIGO	Coordenadas			RESULTADOS (ppm)	Método de análisis
		ESTE	NORTE	ALTITUD		
<b>PUNTO 03</b>	SUELO	485 352	8 403 006	3 010	1.17	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				1.76	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				0.14	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				0.09	D-7623-10 de ASTM
	SUELO	485 356	8 403 008	3 009	4.81	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				3.69	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				3.52	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				0.41	D-7623-10 de ASTM
	SUELO	485 358	8 403 009	3 008	0.44	D-7623-10 de ASTM
	RAIZ				0.66	D-7623-10 de ASTM
	TALLO				0.12	D-7623-10 de ASTM
	HOJA				0.12	D-7623-10 de ASTM



*(Firma manuscrita)*

**M.Sc. Fidel Huasa Maruriti**  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL - FIM UNA

*Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio*

Anexo 3. Informe de análisis de (Hg) por plasma microondas 4210 MP-AES



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



**INFORME DE ANÁLISIS**  
**N°14 -LA136**

<b>ASUNTO:</b> Análisis del metal Mercurio (Hg) por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	<b>CODIGO DE LABORATORIO:</b> L01LA136
<b>PROCEDENCIA:</b> Distrito de Yanahuaya – Provincia de Sandia	<b>N° ORDEN:</b> LMEA – 4210 – MP – AES
<b>TESIS:</b> CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES <i>Bellucia Pentámera N.</i> , <i>Kniphofia Pauciflora B.</i> y <i>Weinmannia Sp. L.</i> DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023	<b>FECHA DE INGRESO:</b> 26/06/2023
<b>TELEFONO:</b> cel. 994366448	<b>TIPO DE SERVICIO:</b> Único
	<b>TESISTA EN DOCTORADO:</b> Wilber Pastor Contreras

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA**

<b>EMPAQUE PRIMARIO:</b> bolsa de ziploc	<b>TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Refrigeración
<b>TIPO DE MUESTRA:</b> Suelo y Biotas	<b>FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:</b> 28/06/2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE:</b> Análisis de Mercurio (Hg)	
<b>CANTIDAD DE MUESTRAS:</b> 12	

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Punto Muestreo	Especie	Código	Coordenadas			RESULTADOS 435.834 nm (ppm)	Método de análisis	% RSD
			ESTE	NORTE	ALTITUD			
PUNTO 01	<i>Kniphofia pauciflora B.</i>	Suelo	485 625	9 402 631	3 398	17.234	Por digestión multiácida	3.69
		Raíz				13.111	Por digestión multiácida	1.26
		Tallo				11.807	Por digestión multiácida	2.31
		Hoja				5.508	Por digestión multiácida	1.23
	<i>Bellucia pentámera N.</i>	Suelo	485 627	8 402 627	3 400	1.944	Por digestión multiácida	1.25
		Raíz				0.566	Por digestión multiácida	3.25
		Tallo				0.360	Por digestión multiácida	2.25
		Hoja				0.193	Por digestión multiácida	2.36
	<i>Weinmannia sp. L.</i>	Suelo	485 626	9 402 633	3 396	0.931	Por digestión multiácida	1.26
		Raíz				0.728	Por digestión multiácida	1.46
		Tallo				0.624	Por digestión multiácida	3.32
		Hoja				0.216	Por digestión multiácida	3.19



*M.Sc. Fidel Guisa Mamani*  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL - FIM UNA

*Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio*



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



**INFORME DE ANÁLISIS**

**N°15 -LA136**

<b>ASUNTO:</b> Análisis del metal Mercurio (Hg) por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	<b>CODIGO DE LABORATORIO:</b> L01LA136
<b>PROCEDENCIA:</b> Distrito de Yanahuaya – Provincia de Sandia	<b>N° ORDEN:</b> LMEA – 4210 – MP – AES
<b>TESIS:</b> CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES <i>Bellucia Pentámera N.</i> , <i>Kniphofia Pauciflora B.</i> y <i>Weinmannia Sp. L.</i> DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023	<b>FECHA DE INGRESO:</b> 26/06/2023
<b>TELEFONO:</b> cel. 994366448	<b>TIPO DE SERVICIO:</b> Único
	<b>TESISTA EN DOCTORADO:</b> Wilber Pastor Contreras

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA**

<b>EMPAQUE PRIMARIO:</b> bolsa de ziploc	<b>TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Refrigeración
<b>TIPO DE MUESTRA:</b> Suelo y Biotas	<b>FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:</b> 27/06/2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE:</b> Análisis de Mercurio (Hg)	
<b>CANTIDAD DE MUESTRAS:</b> 12	

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Punto Muestreo	Especie	Código	Coordenadas			RESULTADOS 435.834 nm (ppm)	Método de análisis	% RSD
			Este	Norte	Altitud			
PUNTO 02	<i>Kniphofia pauciflora B.</i>	Suelo	485 441	8 402 809	3 258	14.365	Por digestión multiácida	1.26
		Raíz				11.999	Por digestión multiácida	2.36
		Tallo				10.510	Por digestión multiácida	2.45
		Hoja				3.891	Por digestión multiácida	1.26
	<i>Weinmannia sp. L.</i>	Suelo	485 443	8 402 811	3 257	0.660	Por digestión multiácida	1.29
		Raíz				0.433	Por digestión multiácida	1.36
		Tallo				0.202	Por digestión multiácida	2.36
		Hoja				0.156	Por digestión multiácida	2.45
	<i>Bellucia pentámera N.</i>	Suelo	485 438	8 402 806	3 260	0.957	Por digestión multiácida	3.69
		Raíz				0.458	Por digestión multiácida	2.45
		Tallo				0.220	Por digestión multiácida	1.25
		Hoja				0.177	Por digestión multiácida	3.36

M.Sc. Marcelina Mamani  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL - FIM UNA

Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio



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



**INFORME DE ANÁLISIS**

**N°16 -LA136**

**ASUNTO:** Análisis del metal Mercurio (Hg) por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES  
**PROCEDENCIA:** Distrito de Yanahuaya – Provincia de Sandia  
**TESIS:** CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES *Bellucia Pentámera N.*, *Kniphofia Pauciflora B.* y *Weinmannia Sp. L.* DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023  
**TELEFONO:** cel. 994366448

**CODIGO DE LABORATORIO:** L01LA136  
**N° ORDEN:** LMEA – 4210 – MP – AES  
**FECHA DE INGRESO:** 26/06/2023  
**TIPO DE SERVICIO:** Único  
**TESISTA EN DOCTORADO:** Wilber Pastor Contreras

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA**

**EMPAQUE PRIMARIO:** bolsa de ziploc  
**TIPO DE MUESTRA:** Suelo y Biotas  
**DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE:** Análisis de Mercurio (Hg)  
**CANTIDAD DE MUESTRAS:** 12

**TEMPERATURA DEL RECIPIENTE:**  Ambiente  Refrigeración  
**FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS:** 27/06/2023

**I.- RESULTADO DE ANALISIS**

Punto Muestreo	Especie	Código	Coordenadas			RESULTADOS 435.834 nm (ppm)	Método de análisis	% RSD
			Este	Norte	Altitud			
PUNTO 03	<i>Bellucia pentámera N.</i>	Suelo	485 352	8 403 006	3 010	0.717	Por digestión multiácida	2.46
		Raíz				0.376	Por digestión multiácida	1.49
		Tallo				0.149	Por digestión multiácida	1.64
		Hoja				0.009	Por digestión multiácida	1.26
	<i>Kniphofia pauciflora B.</i>	Suelo	485 356	8 403 008	3 009	4.811	Por digestión multiácida	2.34
		Raíz				4.649	Por digestión multiácida	2.36
		Tallo				3.548	Por digestión multiácida	2.59
		Hoja				0.411	Por digestión multiácida	1.69
	<i>Weinmannia sp. L.</i>	Suelo	485 358	8 403 009	3 008	0.441	Por digestión multiácida	1.36
		Raíz				0.366	Por digestión multiácida	3.21
		Tallo				0.121	Por digestión multiácida	2.36
		Hoja				0.012	Por digestión multiácida	3.61

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
Facultad de Ingeniería de Minas  
Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental  
PUNO-PERU  
M. Sc. Evelyn Mamián  
JEFE DE LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL - FIM UNA

Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio

## Anexo 4. Certificado de operatividad del plasma microondas 4210 MP-AES

# EQUANTI

Equipos Analíticos y Tecnología de Información S.A.C.

### CERTIFICADO DE OPERATIVIDAD

Declaración del resultado obtenido en la Verificación Operacional del Sistema Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas.

- La Verificación Operacional del sistema, Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas ha sido evaluado de acuerdo con los requerimientos de Agilent Technologies.
- La Verificación operacional fue superada satisfactoriamente.

EQUIPO	MARCA	MODELO	SERIE
Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas	Agilent Technologies	4210	MY20339003
Generador de Nitrógeno	PEAK	Halo	720111431
PC	DELL	Optiplex 7080	BF8H673
Monitor	DELL		JRZ3Q63

Ubicación : Facultad de Ingeniería de Minas  
Compañía : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
Responsable del Servicio : Carlos Quispe  
Fecha : 8 de febrero de 2021  
Nombre y firma del usuario : Yessenia Velasquez  
Firma del responsable del servicio :

**EQUANTI**

.....  
CARLOS QUISPE RIOS  
FIELD SERVICE SPECIALIST

M.Sc. Fidel Huisa Mamani  
JEFE DE LABORATORIO MONITOREO  
TALLAMACCIÓN AMBIENTAL DE LA FM UNA-P

## Anexo 5. Certificado de calibración del plasma microondas 4210 MP-AES



INACAL  
Instituto Nacional  
de Calidad  
Metrología

### Certificado de Calibración

### LAC - 031 - 2016

Laboratorio de Acústica

Página 1 de 9

Expediente	87174	<p>Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)</p> <p>La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP).</p> <p>La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región.</p> <p>Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.</p>
Solicitante	AWS CONSULTING S.A.C.	
Dirección	Ca. Cnel. Bruno Morales Bermúdez N° 241 - Urb. Las Gardenias - Santiago de Surco	
Instrumento de Medición	Sonómetro	
Marca	CASELLA	
Modelo	CEL-6X0	
Procedencia	UK	
Resolución	0,1 dB	
Clase	1	
Número de Serie	0401979	
Micrófono	NO INDICA	
Serie del Micrófono	1808	
Fecha de Calibración	2016-03-22 al 2016-03-23	

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL. Certificados sin firma y sello carecen de validez.

Fecha	Responsable del Área de Electricidad y Termometría	Responsable del laboratorio
 2016-03-23	 EDWIN FRANCISCO GUILLEN MESTAS	 HENRY DÍAZ CHONATE

Instituto Nacional de Calidad - INACAL  
Dirección de Metrología  
Calle Las Camelias N° 815, San Isidro, Lima - Perú  
Telf.: (01) 640-8820 Anexo 1501  
Email: [metrologia@inacal.gob.pe](mailto:metrologia@inacal.gob.pe)  
Web: [www.inacal.gob.pe](http://www.inacal.gob.pe)

Anexo 6. Constancia de nombre de espécimen botánico (*Bellucia pentámera* N.)



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA  
LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL



## CONSTANCIA

EI QUE SUSCRIBE JEFE DEL LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS DE LA U. N. A. PUNO, HACE CONSTAR QUE EL ESPÉCIMEN BOTÁNICO PUESTO A DISPOSICIÓN PERTENECE A LA ESPECIE *Bellucia pentámera* "Coronillo" que, según el Sistema de Clasificación Filogenético de Adolph Engler posee la siguiente Posición Taxonómica.

REINO	Vegetal
SUB REINO	Phanerogamae
DIVISIÓN	Angiospermae
CLASE	Dicocotyledoneae
SUB CLASE	Archychlamydeae
ORDEN	Myrtales
FAMILIA	Melastomataceae
GÉNERO	Bellucia
ESPECIE	<i>Bellucia pentámera</i> N.

SE EXPIDE LA PRESENTE CONSTANCIA A PETICIÓN ESCRITA DEL INTERESADO: **WILBER PASTOR CONTRERAS**, TESISISTA DE LA ESCUELA DE POSGRADO DEL DOCTORADO CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO, PARA LOS FINES QUE VIERE POR CONVENIENTE.

PUNO, C. U. 20 de agosto del 2022



Msc. Edgar Peltuco Ruelas  
INGENIERO AGRÓNOMO  
C.I.P. N° 88134  
JEFE LABORATORIO TAXONOMIA VEGETAL



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FAC. CIENCIAS AGRARIAS  
DECANO  
Juan Marcos Aro Aro, Ph. D.  
DECANO

C c. Arch.

Anexo 7. Constancia de nombre de espécimen botánico *Kniphofia pauciflora* B



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL



**CONSTANCIA**

EI QUE SUSCRIBE JEFE DEL LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS DE LA U. N. A. PUNO, HACE CONSTAR QUE EL ESPÉCIMEN BOTÁNICO PUESTO A DISPOSICIÓN PERTENECE A LA ESPECIE *Kniphofia pauciflora* "Kniphofia" que, según el Sistema de Clasificación Filogenético de Adolph Engler posee la siguiente Posición Taxonómica.

REINO	Vegetal
SUB REINO	Phanerogamae
DIVISIÓN	Angiospermae
CLASE	Monocotyledoneae
SUB CLASE	Methachlamydeae
ORDEN	Liliales
FAMILIA	Liliaceae
GÉNERO	Kniphofia
ESPECIE	<i>Kniphofia pauciflora</i> B.

SE EXPIDE LA PRESENTE CONSTANCIA A PETICIÓN ESCRITA DEL INTERESADO: **WILBER PASTOR CONTRERAS**, TESISISTA DE LA ESCUELA DE POSGRADO DEL DOCTORADO CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO, PARA LOS FINES QUE VIERE POR CONVENIENTE.

PUNO, C. U. 20 de agosto del 2022



C c. Arch.

Anexo 8. Constancia de nombre de espécimen botánico (*Weinmannia sp. L.*)



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL



CONSTANCIA

EI QUE SUSCRIBE JEFE DEL LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS DE LA U. N. A. PUNO, HACE CONSTAR QUE EL ESPÉCIMEN BOTÁNICO PUESTO A DISPOSICIÓN PERTENECE A LA ESPECIE *Weinmannia sp. L.* "wichullo" que, según el Sistema de Clasificación Filogenético de Adolph Engler posee la siguiente Posición Taxonómica.

REINO	Vegetal
SUB REINO	Phanerogamae
DIVISIÓN	Angiospermae
CLASE	Dicotyledoneae
SUB CLASE	Archychlamydeae
ORDEN	Oxalidales
FAMILIA	Cunoniaceae
GÉNERO	Weinmannia
ESPECIE	<i>Weinmannia sp. L.</i>

SE EXPIDE LA PRESENTE CONSTANCIA A PETICIÓN ESCRITA DEL INTERESADO: **WILBER PASTOR CONTRERAS**, TESISISTA DE LA ESCUELA DE POSGRADO DEL DOCTORADO CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO, PARA LOS FINES QUE VIERE POR CONVENIENTE.

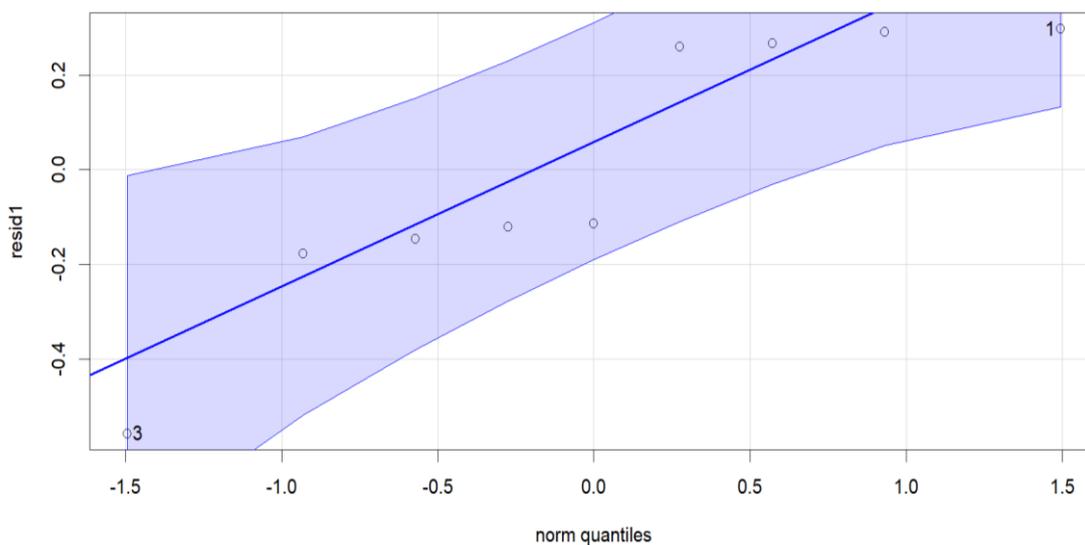
PUNO, C. U. 05 de setiembre del 2022

Miguel Pelinco Ruelas  
INGENIERO AGRÓNOMO  
CIP. N° 88134  
JEFE LABORATORIO TAXONOMIA VEGETAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FAC. CIENCIAS AGRARIAS  
DECANO  
Juan Marcos Ari Aro, Ph. D.  
DECANO

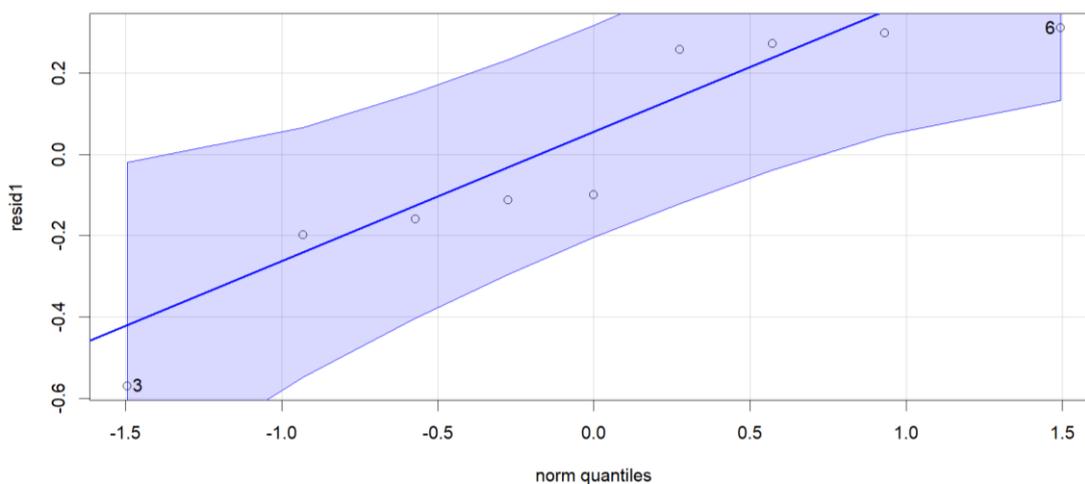
C c. Arch.

### Anexo 9. Verificación de los supuestos de normalidad de los errores para la raíz



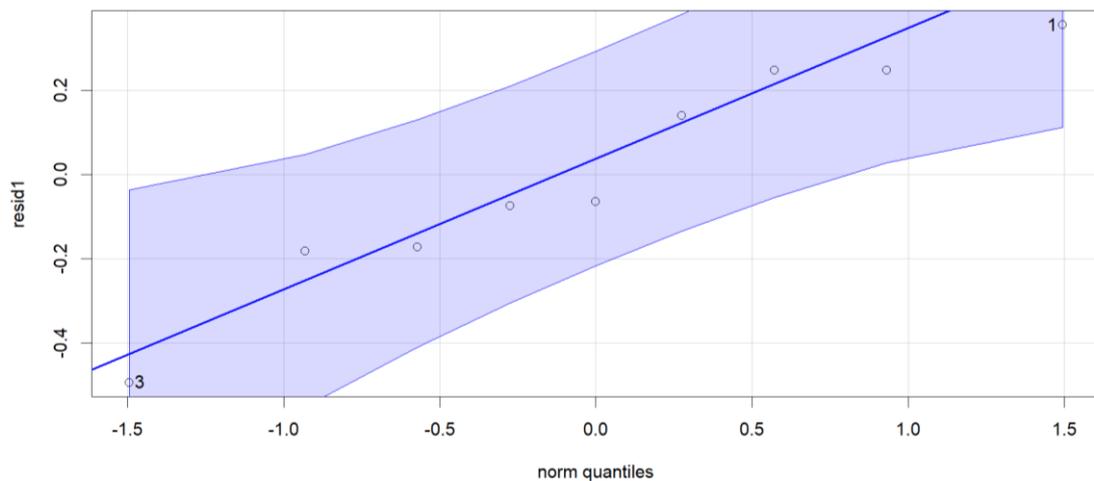
La verificación de los supuestos de normalidad de los errores para la raíz se realizó mediante las pruebas de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk, el proceso de supuestos subyacentes del modelo cumple para la "raíz" en pruebas estadísticas como el test de Dickey-Fuller.

### Anexo 10. Validación de supuestos de normalidad de errores para el tallo



La validación de los supuestos de normalidad de los residuos obtenidos a través de las pruebas de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk. Cumple de los supuestos subyacentes del modelo con respecto a la variable "tallo".

### Anexo 11. Verificación de los supuestos de normalidad de errores para las hojas



La confirmación de la adecuación de los supuestos relacionados con la normalidad de los residuos, derivada de las pruebas de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk, verifica que los supuestos fundamentales del modelo son satisfechos respecto a la variable "hojas".

## PANEL FOTOGRÁFICO

### Anexo 12. Quebrada San Blas



En la imagen se aprecia los aspectos geomorfológicos de la quebrada San Blas, se observa la vegetación en las partes altas, luego se aprecia la vegetación de arbustos en donde se encuentran las especies que se escogieron para su identificación de sus nombres.

### Anexo 13. Laboratorio taxonomía de la FCA-UNAP



El laboratorio de taxonomía perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano en Puno fue el destino al cual se remitieron las muestras de las especies con el propósito de llevar a cabo la identificación de sus nombres científicos.



LABORATORIO TAXONOMIA



*Bellucia pentámera* N.

El procedimiento de muestreo de la especie (*Bellucia pentámera* N.) se llevó a cabo en el primer punto, siguiendo las directrices establecidas por el Ministerio del Ambiente (MINAM) en su guía de muestreo para especies vegetales.



*Kniphofia Pauciflora* B.

La planta de la especie vegetal (*Kniphofia pauciflora* B.) se encuentra en estrecho contacto con los desechos mineros, conocidos como relave, y exhibe una capacidad natural para subsistir y nutrirse de estos residuos. Cabe destacar que dichos relaves contienen concentraciones de mercurio, resultado de las actividades de minería artesanal dedicadas a la extracción de oro en la cabecera de la quebrada San Blas.



*(Weinmannia sp. L.)*

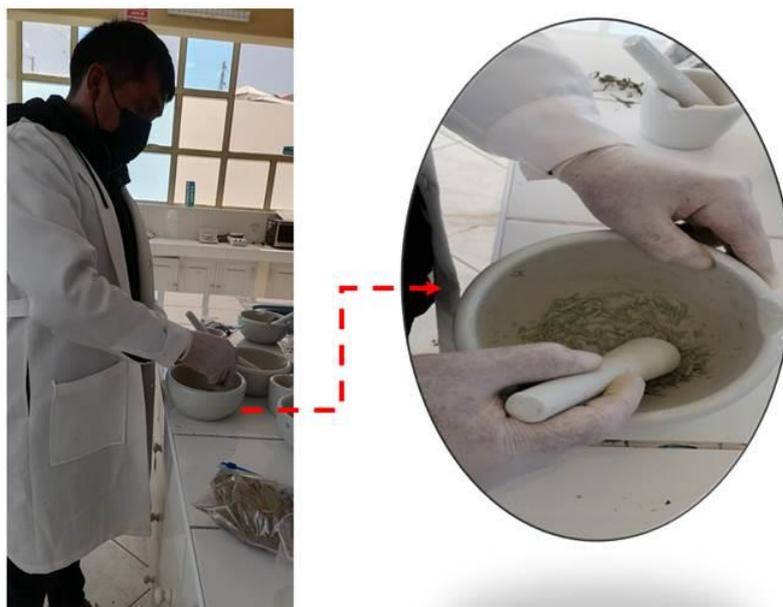
Proceso de muestreo de la especie (*Weinmannia sp. L.*) esto incluye el rotulado, etiquetado, codificación, coordenadas UTM para la ubicación

#### Anexo 14. Proceso de liofilización de la especie



En la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA-P) se dispone de un equipo liofilizador destinado al proceso de secado. La imagen exhibe las secciones de raíz, hoja y tallo de cada una de las especies recolectadas en la quebrada San Blas. El material vegetal se introduce en el liofilizador, donde se alcanza una temperatura muy baja, generalmente inferior a  $-40^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente, mediante una bomba de vacío, se reduce la presión en el equipo para llevar a cabo el proceso de liofilización.

### Anexo 15. Proceso de trituración las especies (*Bellucia pentámera* N.)



Después de un periodo de 14 días en el liofilizador, la siguiente fase implica el proceso de trituración de las muestras. Este paso tiene como objetivo reducir las muestras a partículas más pequeñas de la especie, preparándolas así para su posterior combinación con el ácido clorhídrico (HCl).

### Anexo 16. Proceso de digestión de muestra



La fase subsiguiente implica llevar las muestras combinadas con ácido clorhídrico (HCl) a una cabina extractora de gases. En este entorno, las muestras trituradas serán sometidas a elevadas temperaturas, facilitando la disolución de las especies.

### Anexo 17. Calibración del equipo DMA – 80 y análisis de muestras



En la imagen se observa el equipo analizador de mercurio total (DMA) en el que las muestras fueron expuestas para el análisis de su contenido de mercurio, siguiendo la metodología de ensayo D-7623-10 de ASTM.

### Anexo 18. Mezclado de reactivo y filtrado de muestras



Mesclado de reactivo de 5 ml de ácido nítrico al 65 % luego se realizó el filtrado de las muestras en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la facultad de Ingeniería de Minas de la UNA-P.

### Anexo 19. Equipo espectroscopia de emisión óptica con plasma



Análisis de concentración de mercurio de las especies a longitud de onda Hg (435.834 nm), mediante un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma de microondas 4210 MP-AES.



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo WILBER PASTOR CONTRERAS  
identificado con DNI 40525498 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
DOCTORADO: CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
" CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES BELLUCIA PENTÁMERA N., KNIPHOFIA  
PAUCIFLORA B. Y WEINMANNIA SP. L. DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023 "

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 15 de Diciembre del 2023

FIRMA (obligatoria)



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 WILBER PASTOR CONTRERAS,  
identificado con DNI 40525498 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

DOCTORADO: CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ CONCENTRACIÓN DE MERCURIO DE TRES ESPECIES BELLUCIA PENTÁMERA N., KNIPHOFIA  
PAUCIFLORA B. Y WEINMANNIA SP. L. DE LA PROVINCIA DE SANDIA, 2023 ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

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 conexos, 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 15 de Diciembre del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella