



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Eficacia de fitorremediación del *Stipa ichu* y la *Festuca dolichophylla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio de los suelos contaminados con mercurio por las actividades mineras del distrito de Ananea Puno – Perú

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Siles Nilo ARCE SANCHO

ASESOR

Dra. Julia Marilú CALDERÓN DE ALVARADO

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Arce, S. (2023). *Eficacia de fitorremediación del Stipa ichu y la Festuca dolichophylla usando tiosulfato de amonio y yoduro de potasio de los suelos contaminados con mercurio por las actividades mineras del distrito de Ananea Puno – Perú*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Siles Nilo Arce Sancho
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02429798
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-7987-5074
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Julia Marilú Calderón de Alvarado
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07920871
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1374-9307
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jaime César Mayorga Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10369482
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01066653
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Enoc Efer Jara Peña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08456362
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.1. Remediación de agua, aire y suelo
Grupo de investigación	No aplica.

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: País: Perú Departamento: Puno Provincia: San Román Distrito: San Miguel Centro poblado :Ayabacas Carretera Juliaca Azángaro. Latitud: -15.410675 Longitud: -70.096263
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2019 -2021
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental, y geológica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los veintiséis días del mes de mayo del año dos mil veintitres, siendo las 9.00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000335-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 24 de mayo del 2023, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«EFICACIA DE FITORREMEDIACIÓN DEL *Stipa ichu* Y LA *Festuca dolichophylla* USANDO TIOSULFATO DE AMONIO Y IODURO DE POTASIO DE LOS SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO POR LAS ACTIVIDADES MINERAS DEL DISTRITO DE ANANEA PUNO - PERÚ»

Presentado por el Mg. **SILES NILO ARCE SANCHO**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 07164/FIGMMG/2019 de fecha 20 de agosto del 2019, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

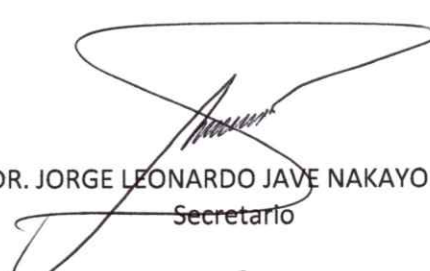
Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

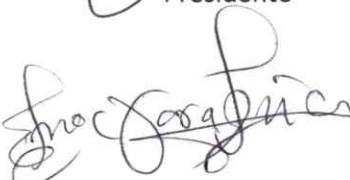
BUENO (15)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **SILES NILO ARCE SANCHO**.

Siendo las 10:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. JAIME CÉSAR MAYORGA ROJAS
Presidente


DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Secretario


DR. ENOC EFER JARA PEÑA
Miembro


DRA. JULIA MARILÚ CALDERÓN DE ALVARADO
Asesor



UNMSM

Firmado digitalmente por DEL VALLE
JURADO Carlos FAU 20148092282
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.08.2022 16:59:03 -05:00

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

Lima, 15 de Agosto del 2022

INFORME N° 000095-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA UNIDAD DE POSGRADO

Dr. Carlos Del Valle Jurado

OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Tec. Wendy María Sanca Bernabé

DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales titulado:
"EFICACIA DE FITOREMEDIACION DEL *Stipa ichu* Y LA *Festuca dolichophylla* USANDO TIOSULFATO DE AMONIO Y IODURO DE POTASIO DE LOS SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO POR LAS ACTIVIDADES MINERAS DEL DISTRITO DE ANANEA PUNO-PERÚ"

AUTOR DEL DOCUMENTO:

MG. SILES NILO ARCE SANCHO

FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

12/08/2022

FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

12/08/2022

SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Diez por ciento (10 %)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

• dialnet.unirioja.es	2%
• repositorio.unasam.edu.pe	2%
• www.scielo.org.co	1%
• Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
• repositorio.uap.edu.pe	<1%
• rcientificas.uninorte.edu.co	<1%
• es.mongabay.com	<1%





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

• repositorio.unc.edu.pe	<1%
• repositorio.ucv.edu.pe	<1%
• Submitted to Universidad Nacional de Colombia	<1%
• repositorio.upct.es	<1%
• Submitted to Corporación Universitaria del Caribe	<1%
• hdl.handle.net	<1%
• documentop.com	<1%
• app.ingemmet.gob.pe	<1%
• Submitted to Universitat Politècnica de València	<1%
• Zhongchuan Liu, Boning Chen, Li-ao Wang, Oksana Urbanovich, Liubov Nagorskaya, Xiang Li, Li Tang. "A review on phytoremediation of mercury contaminated soils", Journal of Hazardous Materials, 2020	<1%
• mddconsortium.org	<1%
• repositorio.continental.edu.pe	<1%
• repositorio.unamad.edu.pe	<1%
• repositorio.utelesup.edu.pe	<1%

OBSERVACIONES

Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

• **15/08/2022**

CARLOS DEL VALLE JURADO
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE POSGRADO

RRL/wsb



EFICACIA DE FITOREMEDIACIÓN DEL *Stipa ichu* Y LA *Festuca dolichophylla* USANDO TIOSULFATO DE AMONIO Y IODURO DE POTASIO DE LOS SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO POR LAS ACTIVIDADES MINERAS DEL DISTRITO DE ANANEA PUNO- PERÚ

por Siles Nilo Arce Sancho

Fecha de entrega: 12-ago-2022 11:55a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1881813790

Nombre del archivo: Tesis_doctorado_-_Siles_Arce_4.docx (4.7M)

Total de palabras: 20792

Total de caracteres: 105166

EFICACIA DE FITOREMEDIACIÓN DEL *Stipa ichu* Y LA *Festuca dolichophylla* USANDO TIOSULFATO DE AMONIO Y IODURO DE POTASIO DE LOS SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO POR LAS ACTIVIDADES MINERAS DEL DISTRITO DE ANANEA PUNO-PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

dialnet.unirioja.es

Fuente de Internet

2%

2

repositorio.unasam.edu.pe

Fuente de Internet

2%

3

www.scielo.org.co

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

1%

5

repositorio.uap.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

6

rcientificas.uninorte.edu.co

Fuente de Internet

<1%

7

es.mongabay.com

Fuente de Internet

<1%

repositorio.unc.edu.pe

8	Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	<1%
11	repositorio.upct.es Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to Corporación Universitaria del Caribe Trabajo del estudiante	<1%
13	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
14	documentop.com Fuente de Internet	<1%
15	app.ingemmet.gob.pe Fuente de Internet	<1%
16	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1%
17	Zhongchuang Liu, Boning Chen, Li-ao Wang, Oksana Urbanovich, Liubov Nagorskaya, Xiang Li, Li Tang. "A review on	<1%

phytoremediation of mercury contaminated soils", Journal of Hazardous Materials, 2020

Publicación

18	mddconsortium.org	<1%
	Fuente de Internet	
19	repositorio.continental.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
20	repositorio.unamad.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
21	repositorio.utelesup.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 35 words

Excluir bibliografía

Activo

DEDICATORIA.

Dedico la presente investigación En memoria de mi Sr. padre Juan Onofre Arce Arce fallecido el año 2022 quien siempre me guio con sus enseñanzas y mucho amor.

AGRADECIMIENTOS.

- A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal de la UNAJ, a sus autoridades y colegas docentes por brindarme las facilidades al haberme permitido el uso de sus laboratorios y compartido la recopilación de datos, a sus alumnos que ahora son egresados por su apoyo en la realización de las pruebas experimentales.
- A mi asesora, Dra. Marilú Calderón por darme las pautas correctas para la elaboración del proyecto de tesis, y sus consejos en la realización de la presente Tesis.
- A la plana docente y directivos de la UPG de la FIGMMG de la UNMSM por difundir los conocimientos necesarios y dar los lineamientos para construir un mejor Perú cada día.
- A mi esposa Carmen por su impulso, cariño y apoyo brindado durante la realización de la presente tesis, asimismo a mis hijas Nicolle y Marissa por ser pacientes y fuente de inspiración en los tiempos de pandemia del COVID-19.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
INDICE GENERAL.....	III
LISTA DE CUADROS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Situación Problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema.....	6
1.2.1. <i>Problema principal</i>	6
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	6
1.3 Justificación Teórica.....	7
1.4 Justificación Práctica.....	7
1.5 Objetivos.....	8
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	8
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	8
2MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Marco Epistemológico de la Investigación.....	9
2.2 Antecedentes de la Investigación.....	12
2.3 Bases Teóricas.....	25
2.3.1 <i>El mercurio en el suelo como contaminante</i>	25
2.3.2 <i>Factores que determinan la acumulación del Mercurio en el suelo</i>	27
2.3.3 <i>El Ichu (Stipa ichu Ruiz & Pav)</i>	31
2.3.4 <i>Chilliwa (Festuca dolichophylla J. Presl)</i>	35
2.3.5 <i>Remediación de los suelos contaminados con Hg</i>	36
2.3.5.2 <i>Fitorremediación del Hg</i>	37
2.3.5.3 <i>Remediación microbiana</i>	39
2.3.6 <i>Fitorremediación del Hg asistida químicamente</i>	40
3METODOLOGÍA.....	42
3.1 Tipo y Diseño de la Investigación.....	42
3.2 Unidad de análisis.....	43

3.3 Población de estudio.	44
3.4 Tamaño de muestra.....	44
3.5 Selección de muestra.	45
3.5.1 Muestreo de Suelos.	46
3.5.2 Procedimiento de recolección de especies vegetales:	47
3.6 Técnicas de recolección de datos.	49
3.6.1 Preparación del sustrato para el terreno.	49
3.6.2 Siembra de plántulas.	49
3.6.3 Seguimiento al crecimiento.	49
3.6.4 Análisis de laboratorio.	50
3.6.5 Cuantificación del mercurio en las plantas, ...	50
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	52
4.1 Presentación de resultados.	52
4.1.1 Propiedades físico químicas del suelo.	52
4.1.2 Resultados de acumulación de mercurio en las plantas.	53
4.1.3 Resultados de contaminante Hg en el suelo.	59
4.2 Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados	62
4.2.1 Análisis y determinación de la dependencia de las variables en estudio.	62
4.2.2 Correlaciones Concentración Hg en el suelo Vs biomasa (peso seco)	65
4.2.3 Factor de Bioacumulación e Interpretación de Resultados	70
4.2.4 Discusión de Resultados.	74
4.3 Prueba de Hipótesis.	77
4.3.1 Hipótesis específicas 1.	77
4.3.2 Hipótesis específicas 2.	79
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	82
Conclusiones.	82
Recomendaciones.	83
6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	84
7 ANEXOS.	88
Lugares de muestreo de suelos contaminados con Mercurio.	90
Ubicación de puntos de muestreo.	92
Muestreo de especies vegetales (<i>Stipa ichu</i> Ruiz & Pav).	93

LISTA DE CUADROS.

N°	Descripción	Pág.
	Cuadro 1: Análisis Preliminares de los suelos de Ananea.....	4
	Cuadro 2: Combinaciones de factores (por cada diseño factorial.....	44
	Cuadro 3: Propiedades fisicoquímicas de las muestras de suelos.	52
	Cuadro 4: Peso seco y masa total de Hg en hojas, tallo y raíz de la <i>Festuca dolichopylla</i> con tiosulfato de amonio.	53
	Cuadro 5: Peso seco y masa total de mercurio de la hoja, tallo y raíz de una sola planta de <i>Festuca dolichopylla</i> con ioduro de potasio).....	55
	Cuadro 6: Peso seco y masa total de mercurio de la hoja, tallo y raíz de una sola planta <i>Stipa ichu</i> con tiosulfato de amonio	56
	Cuadro 7: Peso seco y masa total de mercurio de la hoja, tallo y raíz de una sola planta de <i>Stipa ichu</i> con ioduro de potasio.....	58
	Cuadro 8: Mercurio en el suelo tratado con la <i>Festuca dolichopylla</i> con tiosulfato de amonio(mg/kg).....	60
	Cuadro 9: Mercurio en el suelo tratado con la <i>Festuca dolychopilla</i> con ioduro de Potasio. (mg/kg).....	60
	Cuadro 10: Mercurio en el suelo tratado con el <i>Stipa ichu</i> con tiosulfato de amonio. (mg/kg).....	61
	Cuadro 11: Mercurio en el suelo tratado con <i>Stipa ichu</i> con ioduro de Potasio (mg/kg).....	61
	Cuadro 12: Análisis ANOVA factorial para la <i>Festuca dolichopylla</i> con tiosulfato de amonio.....	63
	Cuadro 13: Análisis ANOVA factorial para la <i>Festuca dolichopylla</i> con ioduro de potasio	63
	Cuadro 14: Análisis ANOVA factorial para el <i>Stipa ichu</i> con tiosulfato de amonio.....	64
	Cuadro 15: Análisis ANOVA factorial para el <i>Stipa ichu</i> con ioduro de potasio.	64

Cuadro 16: Correlación entre el Hg en la biomasa de la <i>Festuca dolichopylla</i> con la concentración de Hg en los suelos usando tiosulfato de amonio.	65
Cuadro 17: Correlación Pearson Cuadro 16	66
Cuadro 18: Correlación entre el Hg en la biomasa de la <i>Festuca dolichopylla</i> con la concentración de Hg en los suelos usando ioduro de potasio.....	66
Cuadro 19: Correlación Pearson Cuadro N° 18	67
Cuadro 20: Correlación entre el Hg en la biomasa de la <i>Stipa ichu</i> con la concentración de Hg en los suelos usando tiosulfato de amonio.....	68
Cuadro 21: Correlación Pearson Cuadro N° 20	68
Cuadro 22: Correlación entre el Hg en la biomasa del <i>Stipa ichu</i> con la concentración de Hg en los suelos usando ioduro de potasio.	69
Cuadro 23: Correlacion de Pearson del cuadro 22	69
Cuadro 24: BAF de la <i>Festuca dolichopylla</i> con tiosulfato de amonio.	70
Cuadro 25: BAF de la <i>Festuca dolichopylla</i> con ioduro de potasio.	71
Cuadro 26: BAF del <i>Stipa ichu</i> Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio.	72
Cuadro 27: BAF de la <i>Stipa ichu</i> con ioduro de potasio.....	73
Cuadro 28: Eficacia de la fitorremediación con <i>Festuca dolichopylla</i> y <i>Stipa ichu</i> en los suelos contaminados con Hg.....	74
Cuadro 29: Cuadro comparativo con otras especies fitorremediadoras.	75
Cuadro 30: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de tiosulfato de amonio más el tiempo con la <i>Festuca dolichopylla</i>	77
Cuadro 31: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de ioduro de potasio más el tiempo con la <i>Festuca dolichopylla</i>	78
Cuadro 32: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de tiosulfato de amonio más el tiempo con el <i>Stipa ichu</i> .80	
Cuadro 33: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de ioduro de potasio más el tiempo con el <i>Stipa ichu</i>	81
Cuadro 34: Control de crecimiento de las plantas de <i>Festuca dolichopylla</i> empleadas en la fitorremediación.	88
Cuadro 35: Control de crecimiento de las plantas de <i>Stipa ichu</i> empleadas en la fitorremediación.....	89

LISTA DE FIGURAS.

N°	Descripción	Pág.
	Figura 1: Producción de oro en regiones 2018. (SNMPR, 2020).....	2
	Figura 2: Producción minera en Puno. (Marcera, 2019)	3
	Figura 3: Precio del oro en Puno. (SNMPR, 2020)	3
	Figura 4: Especiación del Hg(II) en función del pH. (Adriano, 2001)	28
	Figura 5: Estabilidad del mercurio según Eh-pH. (Adriano, 2001)	29
	Figura 6: Retención del mercurio en diferentes componentes del suelo influenciados por el pH. (Adriano, 2001).....	30
	Figura 7: El <i>Stipa ichu</i> Ruiz & Pav	34
	Figura 8: <i>Festuca dolichophylla</i> J. Presl	36
	Figura 9: Puntos de muestreo.....	46
	Figura 10: Lugar de muestreo en Ananea.	47
	Figura 11: Recolección de plántulas.....	48
	Figura 12: Diagrama de flujo del proceso experimental seguido.	51
	Figura 13: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con tiosulfato de amonio, para la <i>Festuca dolichophylla</i>	54
	Figura 14: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con ioduro de potasio para la <i>Festuca dolichophylla</i>	55
	Figura 15: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con tiosulfato de amonio para el <i>Stipa Ichu</i>	57
	Figura 16: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con ioduro de potasio para el <i>Stipa Ichu</i>	58
	Figura 17: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°30 ..	78
	Figura 18: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°31 ..	79
	Figura 19: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°32 ..	80
	Figura 20: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°33 ..	81

RESUMEN.

En el distrito de Ananea Puno - Perú se encuentra un pasivo ambiental en los suelos, que fue originado por actividades mineras informales desde los años 90. Con el suelo de dicho lugar se realizó una fitorremediación en laboratorio utilizando la *Festuca dolichophylla* J.Presl y el *Stipa ichu* Ruiz & Pav plantas nativas del lugar, con asistencia del tiosulfato de amonio y ioduro de potasio como aceleradores. Las muestras de suelos fueron extraídas de las áreas impactadas con mercurio y se utilizó el diseño factorial que tuvo como variables respuesta la concentración de mercurio total (HgT) en suelo y en los tejidos vegetales; como factores: el nivel de tiosulfato de amonio en el suelo y el tiempo de crecimiento de la planta.

Los suelos que fueron muestreados del distrito de Ananea tienen un pH neutro, el mercurio elemental constituye el 56% de la cantidad total de mercurio en el suelo. Las concentraciones de THg en el suelo oscilan entre 44 y 53 mg/kg, que es casi 2 veces mayor el límite superior para el contenido de mercurio (24 mg/kg) en suelos extractivos en Perú. El BAF (Factor de bioacumulación) que se obtuvo para la *Festuca dolichophylla* J.Presl fue de 0.38 en las hojas, para 2 g de tiosulfato de amonio por kg de suelo, y 0.2 para 2 g de ioduro de potasio por kg de suelo. Para el *Stipa ichu* Ruiz & Pav el BAF fue de 0.22 para 2 g de tiosulfato de amonio por Kg de suelo y 0.17 para 2 g de ioduro de potasio por kg de suelo, lo que indica que ni la *Festuca dolichophylla* J.Presl ni el *Stipa ichu* Ruiz & Pav son plantas hiperacumuladoras. El contenido de THg (mercurio total) se redujo en el suelo en relación con el suelo inicial en 43.67 mg/Kg, obteniéndose una eficacia de hasta 82% para la *Festuca dolichophylla* y 73% para el *Stipa ichu*

Palabras Clave: Mercurio, Fito remediación asistida, *Festuca dolichophylla*, *Stipa ichu*, Tiosulfato de amonio, ioduro de potasio.

SUMMARY.

In the district of Ananea Puno, Peru, there is an environmental liability, which was caused by informal mining activities since the 1990s. A laboratory phytoremediation was carried out using *Festuca dolichophylla* J.Presl and *Stipa ichu* Ruiz & Pav, native plants of the area, with the assistance of ammonium thiosulfate and potassium iodide as accelerators. Soil samples were extracted from the areas impacted with mercury, in the present investigation a factorial design was used with the following response variables: the concentration of total mercury (HgT) in soil and plant tissues, and as factors the level of ammonium thiosulfate in the soil and the time of plant growth.

The soils that were sampled from the Ananea district have a neutral pH, elemental mercury constitutes 56% of the total amount of mercury in the soil. THg concentrations in the soil range from 44 to 53 mg/kg, which is almost 2 times the upper limit for mercury content (24 mg/kg) in extractive soils in Peru. The BAF (Bioaccumulation Factor) obtained for *Festuca dolichophylla* J.Presl was 0.38 in leaves, for 2 g of ammonium thiosulfate per kg of soil, and 0.2 for 2 g of potassium iodide per kg of soil. For *Stipa ichu* Ruiz & Pav the BAF was 0.22 for 2 g ammonium thiosulfate per kg soil and 0.17 for 2 g potassium iodide per kg soil, indicating that neither *Festuca dolichophylla* J.Presl nor *Stipa ichu* Ruiz & Pav are hyperaccumulator plants. THg (total mercury) content was reduced in the soil relative to the initial soil by 43.67 mg/kg, obtaining an efficiency of up to 82%. For *Festuca dolichophylla* and 73% for *Stipa ichu*

Key words: Mercury, Assisted Fitoremediation, *Festuca dolichophylla*, *Stipa ichu*, Ammonium thiosulfate, Potassium iodide,

1 INTRODUCCIÓN.

1.1. Situación Problemática.

A nivel global y nacional, cada vez hay problemas mayores de contaminación por metales pesados, que se relacionan con la salud de la población y los daños causados al medio ambiente. La contaminación ambiental es tema principal de actualidad y parte de este caso es creado por la explotación de la minería informal, que son actividades humanas, que no tienen un control suficiente que limite su afectación al medio ambiente, y que al final lo que causará es escases de recursos y un impacto socio ambiental negativo.

En el Perú la contaminación de los suelos por metales pesados es una realidad debido a la tradición minera que existe en el país desde tiempos antiguos y recién desde hace muy poco tiempo se están exigiendo y aplicando políticas de control ambiental a la minería.

Según la publicación “Conservación y uso sostenible de ecosistemas para la provisión de servicios eco sistémicos” del Ministerio del Ambiente, que fue lanzado en enero de 2017, se estima que en los recientes 20 años más de 3000 toneladas de mercurio fueron vertidos a los ríos de la selva, contaminando el agua de estos ríos, a los seres que habitan en él, a los peces y a las poblaciones humanas que consumen el agua. En los últimos 18 años, la minería aurífera en la región de Madre de Dios, han deforestado aproximadamente unas 30 000 hectáreas de bosque tropical, principalmente en las cuencas de Huepetuhe y Caychive. (Ministerio del Ambiente, 2017).

En el Perú, la minería aurífera informal, en sus inicios se desarrollaba en Madre de Dios, Puno, Arequipa y La Libertad como una manera de economía de subsistencia en minas abandonadas o que no

han sido cerradas. No obstante, a mediados de la década del 2000 al 2010 las actividades de la minería informal e ilegal crecieron por todo el territorio nacional. (Ministerio del Ambiente, 2017)



Figura 1: Producción de oro en regiones 2018. (SNMPR, 2020)

Uno de los pasivos ambientales importantes que se encuentran en el Perú son los que se ubican en el departamento de Puno, provincia de Putina, específicamente en el distrito de Ananea, por las actividades mineras artesanales informales existentes en dicho distrito, las cuales se han venido incrementado desde los años 90, actividad realizada por los pobladores de la zona, que ha venido intensificándose en los últimos 8 años, trayendo como consecuencia la contaminación de la cuenca del río Ramis con metales pesados entre ellos el mercurio. Es conocido que las operaciones artesanales poseen una baja productividad, tienen malas condiciones de seguridad ocupacional y generan un impacto ambiental no positivo a la flora y fauna silvestre, así como también impacta a la ganadería, aumenta los riesgos a la salud pública; la degradación que se produce no solo es biológica, también es visual y paisajístico, y las áreas más afectadas son las riveras del río en mención. (Rodríguez, 2014).

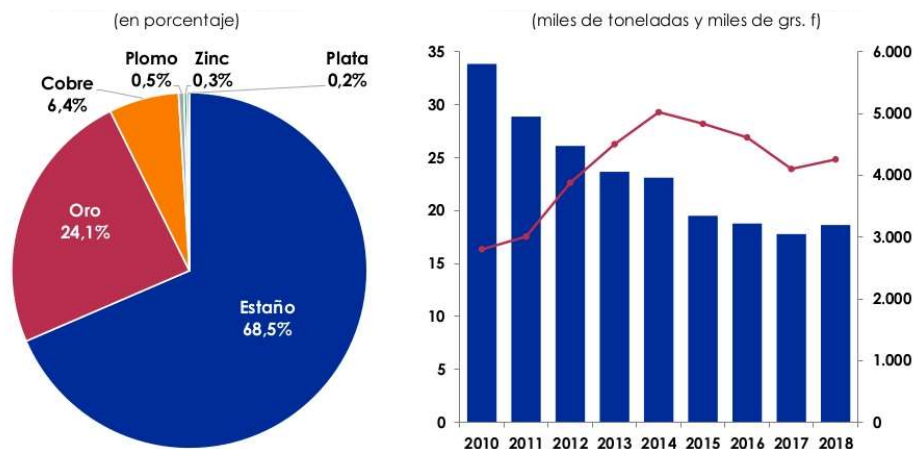


Figura 2: Producción minera en Puno. (Marcera, 2019)

En el departamento de Puno, se estima que se están perdiendo cada año alrededor de 15 toneladas de mercurio en estado líquido y que esta pérdida estaría en aumento en los últimos años, a razón de un 10% anual esto a causa del incremento de la producción de oro y la gestión inadecuada de la formalización de la minería ilegal por parte del estado (Figura 2), trayendo como consecuencia un incremento de la contaminación de los cauces y poniendo en riesgo de salud pública.



Figura 3: Precio del oro en Puno. (SNMPR, 2020)

El uso no controlado y no eficiente del mercurio para amalgamar el oro causa que elevadas cantidades de este elemento se desperdicien y se viertan al medio ambiente en su estado líquido, esto cuando se hace el proceso de amalgamación o también puede emanar gases de mercurio cuando se hace el refogado. La pérdida de mercurio es aproximadamente de diez gramos por tonelada de mineral tratado, siempre y cuando se tengan los cuidados necesarios para el trabajo de amalgamación, caso contrario las pérdidas son mayores. (Hinojosa, 2016).

Ante los efectos en la salud humana y en los ecosistemas de los metales pesados entre ellos el mercurio, es por eso que se hace necesario la búsqueda de nuevos métodos que permitan el decremento del contenido de metales pesados en las principales áreas de depósito, como son el suelo, el agua y el aire. En el caso de Ananea se observó que hay una acumulación de Hg por encima del ECA suelo según normatividad peruana que es de 24 mg/kg para un suelo comercial, industrial o extractivo y 6.6 mg/kg para suelo agrícola y residencial. (Cuadro 1).

Cuadro 1: Análisis Preliminares de los suelos de Ananea.

Procedencia	Pb mg/kg	Hg mg/kg	Cd mg/kg	Cianuro mg/kg
Pampa Blanca	134	30	10	2,3
Corporación Minera Ananea	90	21	12	1,2
Chaquiminas	128	18	14	0.9
La Rinconada	150	37	25	3.2

Fuente: UNAJ- Puno.

De acuerdo al cuadro 1 si bien se observa que en algunos casos los valores de mercurio están por debajo de los límites que se dan en el

ECA industrial y en todos los casos supera el ECA residencial; considerando que cerca al área minera existe población que son los habitantes del distrito La Rinconada con una población de 12,615 habitantes permanentes. (INEI, 2017).

Las técnicas habituales de remediación de metales pesados en el suelo incluyen tratamientos como ex situ como in situ del suelo contaminado. Estos tratamientos físicos-químicos convencionales resultan económicamente caros y no tan adecuados para aplicar a terrenos muy grandes, la fitorremediación ha probado ser una técnica prometedora para recuperar estos suelos, no obstante, la selección de especies para ser usadas en la fitorremediación es clave para obtener resultados satisfactorios como es el caso de la facultad de las plantas para acumular, metabolizar, volatilizar o absorber, contaminantes orgánicos y/o inorgánicos así como la capacidad de estas a adaptarse al medio donde se quiera efectuar la remediación. (Garcia & Dorronsoro, 2005).

Por tal razón, el estudio de las especies vegetales que se desarrolló en el área contaminada de Ananea como es el caso de la planta *Stipa ichu* Ruiz y Pav, que dio resultados en la absorción de plomo obteniendo resultados que mostraron que esta planta es una bioacumuladora de plomo, absorbiendo 310,45 mg de Pb/kg de planta del suelo. (Venegas, 2016), corroborando la hipótesis de que las plantas nativas son las más adecuadas para Fito remediar sus propios espacios naturales. Es por tal razón que en el presente estudio se eligió al *Stipa ichu* Ruiz y Pav y a otra planta nativa de similares características que es la *Festuca dolichophylla*. J. Presl

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema principal.

¿Cuál es la eficacia de fitorremediación del *Stipa ichu* y la *Festuca dolichophylla* usando al tiosulfato de amonio y ioduro de potasio como aceleradores químicos de suelos contaminados con mercurio por actividades mineras del distrito de Ananea Puno-Perú?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Cuál es la capacidad fitorremediadora del *Stipa ichu* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio en la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio?

¿Cuál es la capacidad fitorremediadora de la *Festuca dolichophylla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio en la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio?

1.3 Justificación Teórica.

Esta investigación se desarrolló con el propósito de aportar al conocimiento existente de las ciencias ambientales el hecho de que las especies vegetales *Stipa ichu* Ruiz & Pav y la *Festuca dolichophylla* J. Presl tienen capacidad fitorremediadora para el mercurio en suelos contaminados con este metal usando al tiosulfato de amonio y ioduro de potasio como acelerador químico, esto se probó matemática con el estadístico F.

1.4 Justificación Práctica.

Esta investigación se realizó por que existe la necesidad de remediar los suelos contaminados con mercurio en muchas partes del país y del mundo, donde puedan sobrevivir el *Stipa ichu* Ruiz & Pav y la *Festuca dolichophylla* J. Presl como es el caso de la localidad de Ananea (4660 msnm) del departamento de Puno, ya que en dicha localidad, la minería informal hace uso indiscriminado y sin control del mercurio para la obtención de oro durante la amalgamación y el refogado, contaminando con este metal pesado el suelo de la zona donde hay población. En la presente investigación se desarrolló un método de fitorremediación asistida con reactivos químicos, con estos resultados favorables será posible aplicar la remediación de los suelos haciendo uso de estas plantas nativas que sobreviven y proliferan a tal altitud, los resultados beneficiaran a toda la poblaciones que habitan en zonas contaminadas con mercurio como es el caso del distrito de Ananea.

Como justificación metodológica se tiene que la fitorremediación de mercurio de suelos contaminados con este metal empleando *Stipa ichu* Ruiz & Pav y la *Festuca dolichophylla* J. Presl adicionalmente evaluó el efecto de aceleradores, para lo cual se elaboró una metodología de aplicación de estos aceleradores durante la fitorremediación tal como se menciona en la justificación práctica que se constató mediante la

aplicación de metodología científica, situaciones que fue investigadas por la ciencia, demostrándose su validez y confiabilidad y que podrán ser replicados y utilizados en otros trabajos de investigación.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general

Determinar la eficacia de fitorremediación del *Stipa ichu* y la *Festuca dolichophylla* usando al tiosulfato de amonio y ioduro de potasio como aceleradores químicos de suelos contaminados con Mercurio por actividades mineras del distrito de Ananea Puno-Perú.

1.5.2 Objetivos específicos.

Calcular la capacidad fitorremediadora del *Stipa ichu* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio en la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio.

Calcular la capacidad fitorremediadora de la *Festuca dolichophylla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio en la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio.

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 Marco Epistemológico de la Investigación.

En los primeros años de este siglo XXI, en toda la extensión de los andes se encuentra un grupo heterogéneo de ecosistemas costeros, desérticos, humedales, valles costeros, valles interandinos, mesetas altiplánicas, nevados, áreas de puna, pantanales, bosques lluviosos, bosques tropicales, y muchos otros ecosistemas que albergan una gran diversidad de flora y fauna en un gran porcentaje de la población mundial. En Sudamérica tenemos, la cordillera de los andes, la selva amazónica, las pampas de argentina, las llanuras amazónicas, las mesetas del Orinoco, la tierra del fuego y otras áreas importantes que albergan flora fauna, culturas y lenguajes endémicos. Como es el caso de los climas de la sierra en especial del altiplano puneño lugar donde se realiza nuestra investigación tiene una biodiversidad rica y propia del lugar que también es endémica (Dussel, Mendieta, & Bohorquez, 2012).

La ética ecológica surge por la necesidad y exigencia de “escuchar” a la naturaleza. Boff afirma que “en síntesis todos tienen algo que reclamar, los pobres de la sociedad, la tierra, los ecosistemas, la flora y la fauna” (Boff, 2008).

En esta acción de oírse entre seres humanos y escuchar a los no humanos significa que “lo decisivo en la ética no es lo que queremos que sea o lo que consigamos imponer mediante el poder, sino es lo que la realidad misma dice y exige de cada uno de los que se nosotros los humanos y en sintonía con ella. El ser humano vive éticamente cuando renuncia a estar sobre los otros para estar junto a los otros” (Boff, 2008).

Para desarrollar una buena ética ecológica, El autor Boff propone hacer una fusión entre la naturaleza el medio ambiente y los seres humanos para poder entender las necesidades del medio ambiente. Sin embargo afirma que esta reconexión no se da voluntariamente, tiene que darse cuando nosotros ampliamos nuestro horizonte nuestra forma de ver el medio ambiente, más lejos de nuestra racionalidad de nuestro entendimiento, y nos daremos cuenta, de que nuestro mundo es portador de muchos misterio mensaje. Estos misterios no solo lo ven los religiosos y místicos (los chamanes populares), sino también los científicos que alcanzan a los confines del conocimiento de la materia. (Boff, 2008).

Una fusión con la Tierra como si fuera un todo, "*dignitas terrae*", debe traspasar por una ecología dentro del sistema y por un comprensión a la naturaleza, y para que vuelva "la nueva alianza que el ser humano debe establecer con la naturaleza tiene que pasar en primer lugar por su corazón". Una vez, "reconciliado consigo mismo, el ser humano puede, sin coerción, convivir con sus semejantes, y también con todos los demás seres" (Boff, 2008).

De acuerdo a todo lo anterior mencionado por Boff, en el área de estudio de Ananea , el ser humano no respeta sus tradiciones, que lo conectan con la ecología de la zona, cediendo a los intereses económicos y siendo ellos mismos los habitantes de Ananea que en algún tiempo fueron presas de la pobreza por lo que decidieron no respetar a la ecología, a la Pachamama, de ahí viene el grito de la naturaleza, el grito de la fauna y flora, el grito de la misma sociedad por el enorme daño que se hizo en la zona producto de la actividad minera.

Sabemos que la mayor parte de los residuos no son generados por las personas de menores recursos económicos. Ellos no son los dueños de las industrias contaminadoras, ellos tampoco son esas los principales

consumidores de los bienes empaquetados o envasados (botellas, empaques, cajas, latas, etc.). Pero, son las personas pobres los primeros en sufrir las consecuencias por los diferentes tipos de residuos que se producen. Sin embargo son los pobres los que generan una pequeña fracción de basura, y al final ésta termina toda alrededor de ellos, pero no es posible para ellos el sistema. La forma de pensar el sistema que generalmente son dadas por las personas dominantes y las personas ricas, se necesita ser persona con recursos financieros para vivir en lugares alejados de la basura que uno mismo produce (Dussel, Mendieta, & Bohorquez, 2012).

Una característica principal y esencial de la filosofía socio ambiental es prestar atención a todas las comunidades propias y específicas como es la comunidad que vive en Ananea y a sus entornos de paisaje y ecológicos, históricos, de arte, culturales y sociopolíticos que existen en ella. (Baker, 1981). La preocupación de lo que pasa durante el día día de las comunidades humanas el medio ambiente y la vida de los animales y plantas nos ayudan a descubrir que existe una biodiversidad en el medio ambiente y en las comunidades sociales son tan heterogéneos que es difícil su comprensión. El acercamiento con esta diversidad de formas de vida que son amenazadas por las actividades humanas son duros a su existencia, hace que den acciones de conservación que ayudan a la coexistencia con la diversidad cultural y biológica. (Baker, 1981)

En atención a las necesidades de la tierra, de los seres vivos, de la sociedad circundante a las zona de estudio de Ananea, es que se requiere una urgente remediación del suelo y para no seguir afectándola en forma indefinida es que en nuestro proyecto, remediar el suelo contaminado con mercurio mediante plantas nativas de la zona a fin de no dañar más el ecosistema y devolver a la naturaleza en parte lo que fue y de cierta manera quedará reestablecido el equilibrio ecológico.

2.2 Antecedentes de la Investigación.

A nivel internacional:

(Lui, et al., 2020). En su estudio examinaron diversas publicaciones actuales en las que se introducen diversas especies de plantas experimentales para la acumulación de Hg y las técnicas de ayuda para mejorar la fitorremediación de los suelos contaminados con Hg. Enumeraron detalladamente las especies de plantas experimentales para la acumulación de Hg. Examinaron los diversos tipos de aceleradores químicos y el efecto promotor de los aceleradores químicos para la acumulación y transferencia de Hg para diversas especies de plantas. Examinaron a los tipos de genes transgénicos y el efecto promotor de las plantas transgénicas para la acumulación y transferencia de Hg. También analizaron la composición de los microorganismos de la rizósfera de las plantas de remediación y el efecto de estos microorganismos de la rizósfera en la fitorremediación de los suelos contaminados con Hg.

Como resultados del estudio determinaron:

- El factor de acumulación o translocación de Hg. (TF) es superior a 1,0 para algunas especies de plantas, sin embargo, el factor de bioacumulación (BAF) es superior a 1,0 sólo para *Axonopus compressus*.
- Los factores que afectan a la fitorremediación de los suelos contaminados con Hg. son las especies vegetales, las propiedades del suelo, las condiciones meteorológicas y la biodisponibilidad y heterogeneidad del Hg.
- Los aceleradores químicos que se pueden seleccionar son: el yoduro de potasio, el abono orgánico, el sulfato de amonio, el tiosulfato de

amonio, el sulfito de sodio, el tiosulfato de sodio, el ácido clorhídrico y el fertilizante de azufre para promover la absorción del Hg por las plantas.

- Algunas plantas transgénicas pueden acumular más Hg que las plantas no transgénicas.
- Algunos microorganismos de la rizósfera pueden aumentar la movilidad del Hg en los suelos y son beneficiosos para la fitorremediación.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- La fitorremediación de los suelos contaminados con Hg es una forma prometedora que tiene la ventaja de una baja inversión, un funcionamiento sencillo y la remediación in situ.
- Se han utilizado muchas especies de plantas para probar la capacidad de acumular y transferir Hg. Hasta ahora no se ha reconocido ningún hiperacumulador de Hg aunque algunas especies de plantas se definen como "hiperacumulador potencial de Hg".
- Es necesario investigar e inventariar las concentraciones de Hg en los tejidos vegetales de más especies de plantas, y el umbral del nivel de concentración de Hg de los hiperacumuladores debe ser claro.
- La fitorremediación química mejorada, las plantas transgénicas mejoradas y los microorganismos en la rizosfera, así como la mejora de la fitorremediación son las principales formas de ayudar a la fitorremediación de los suelos contaminados con Hg, sin embargo, hay muchos aspectos que deben estudiarse.
- La tecnología de fitorremediación para la remediación de los suelos contaminados con Hg puede utilizarse en la aplicación práctica de la ingeniería si estos abordan los principales desafíos.

(Marrugo, et al., 2020) En su estudio evaluaron la capacidad de fitorremediación de tres genotipos diferentes de *caupí* cultivado en

suelos contaminados con mercurio de zonas de minería de oro, comparando un genotipo nativo con dos líneas comerciales L-019 y L-042. Las plantas se cultivaron en suelos modificados a diferentes concentraciones de Hg (es decir, 0,2, 1, 2, 5 y 8 mg/kg). Después de tres meses de exposición, se determinaron el crecimiento de la planta, la producción de semillas y la acumulación de Hg en diferentes tejidos de la planta (raíz, hoja, semilla y tallo), se calcularon los índices de transferencia de metales entre el suelo y la planta, como factores de translocación, bioconcentración y bioacumulación.

Los resultados fueron los siguientes:

- La variedad nativa presentó la mayor producción de semillas (3,8 g), sin embargo, la biomasa vegetal más alta (7,9 g) se observó en la línea L-019, ambas en un suelo contaminado con Hg de 1 mg/kg.
- Los diferentes tejidos de la planta difirieron en cuanto a la concentración de Hg (raíz > hoja > tallo), la línea L-042 acumula más Hg tanto en las raíces como en las hojas, mientras que la línea L-019 acumula más metal en los tallos.
- En la línea L-019, las concentraciones de Hg en el fruto mostraron diferencias significativas siendo mayores en las valves que en las semillas.
- Los factores de transferencia fueron generalmente inferiores a 1 e indican la baja acumulación de Hg por los caupís.

Llegándose a las conclusiones siguientes:

- Las plantas de caupí evaluadas mostraron diferencias en la acumulación de Hg en sus tejidos. cabe destacar que, de las tres variedades evaluadas, el caupí nativo se adaptó muy bien en suelos con niveles de Hg de 2 mg/kg, lo que dio lugar a una producción de biomasa y semillas que está dentro de los límites normales para el cultivo en zonas tropicales.

- Sin embargo, en todas las variedades evaluadas sometidas a suelos con concentraciones de Hg superiores a 2 mg/kg, tanto la biomasa como la producción disminuyeron más del 50%.
 - La variedad nativa mostró resistencia a la translocación de Hg a la semilla, demostrando que puede ser cultivada en suelos con alto contenido de metales.
- ❖ (Teng, et al., 2020) examinaron sistemáticamente las novedades recientes en materia de remediación de suelos contaminados con Hg. resumiendo, los avances en las tecnologías de remediación para eliminar la contaminación por Hg del suelo, incluyendo la tecnología de remediación física, química y biológica. Clasificaron todas las tecnologías de remediación en seis técnicas, entre ellas la desorción térmica, la extracción electrocinética, el lavado de suelos, la estabilización química, la fitorremediación y la tecnología microbiana. Y discutieron los desafíos y las perspectivas futuras de la remediación de los suelos contaminados con Hg.

Llegaron a los siguientes resultados:

- La principal fuente de contaminación por Hg en el suelo proviene de lo natural.
- Hay otras fuentes de contaminación, especialmente las actividades humanas, como las actividades industriales y agrícolas. La minería, la fundición de metales, la combustión de combustible fósiles, la aplicación de plaguicidas e irrigación de aguas residuales conducen significativamente a una acumulación de Hg en el suelo.
- Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología, los métodos de remediación se han desarrollado mucho, materiales emergentes, como los nanomateriales (carbono nanotubos, nanoesferas y nanocompuestos magnéticos), grafeno, el biocarbón y otros

materiales nuevos se han convertido en puntos calientes de investigación.

- La tecnología de la ingeniería genética también se aplica gradualmente a la remediación.
- Por lo general, las plantas con capacidad de hiperacumulación son pocas, y la mayoría las plantas no tienen la capacidad de hiperacumulación.
- Combinando con la ingeniería genética, la fitorremediación se ha convertido en el remedio más prometedor para el suelo contaminado con Hg, la ingeniería genética también es beneficioso para el desarrollo de la tecnología microbiana de remediación.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- Cuando se llevan a cabo proyectos de remediación específicos, debe seleccionar los métodos de remediación adecuados en función de sus ventajas y desventajas y los tipos de suelo. Por ejemplo, en la rehabilitación de suelos agrícolas se debe utilizar cuidadosamente desorción térmica porque una descomposición térmica demasiado alta la temperatura destruirá la materia orgánica en el suelo, el cambio la estructura del suelo, e incluso se vuelven inapropiados para su uso como tierra agrícola. Cuando se usa el lavado del suelo y la estabilización química se debe prevenir la contaminación secundaria de los reactivos. En esencia, la estabilización química sólo cambia la forma de Hg en el suelo; por lo tanto, considerando que diferentes los reactivos tienen diferentes tiempos de reacción, es necesario controlar todo el proceso de remediación y añadir reactivos a tiempo para asegurar que la reparación se encuentre en un estado efectivo.

- La fitorremediación ha recibido mucha más atención entre los varios métodos de remediación, una planta hiperacumuladora efectiva para el Hg aún no se han encontrado.
- Las futuras tecnologías de remediación que se utilizarán para la contaminación por Hg en el suelo deben tratar de ser económicas y fácil de operar y tomar en cuenta la eliminación de los residuos de remediación de Hg.
- ❖ (Vidal, Marrugo, Jaramillo, & Pérez, 2010) determinaron la aplicación de ácido cítrico, el tiempo de crecimiento del guarumo y la influencia del grado de contaminación, sobre la tasa de remoción de mercurio en suelo.

Obteniendo como resultados:

- Que después de 4 meses de crecimiento de la planta, los porcentajes de remoción estuvieron entre 33.7% y 15.7% esto a causa de que la capacidad del guarumo para acumular grandes cantidades del metal sin presentar efectos tóxicos de importancia, así como al alto contenido de mercurio biodisponible en los suelos contaminados, lo que llevó también a que el ácido cítrico no fuera una influencia de significancia sobre la recuperación de mercurio.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- La *Cecropia peltata* es una especie vegetal que acumula en sus tejidos gran cantidad de mercurio en sus tejidos, y la parte de la planta que presenta mayor concentración de Hg T, son las raíces, seguida de las hojas y por último los tallos.
- El grado de contaminación de los suelos está relacionado con la capacidad de acumulación en las raíces, y esta capacidad se va incrementando a través del tiempo por el crecimiento del guarumo, debido a la mayor cantidad de contaminante que es retenido en el

tejido epidérmico como un mecanismo de defensa a los efectos tóxicos que puede generar el mercurio en las partes superiores de la planta.

- En cuatro meses de crecimiento de la planta, las tasas de remoción de mercurio total en suelo estuvieron entre 33.7% y 15.7 %, lo que quiere decir que esta planta tiene una gran capacidad para ser utilizada en el tratamiento de suelos contaminados por fitorremediación.
 - las variables de mayor influencia en las tasas de remoción del suelo son: la acumulación del contaminante en tejidos, el grado de contaminación del suelo y el tiempo de tratamiento y; hay que resaltar que el ácido cítrico no contribuye a una remoción de Hg del suelo contaminado ni a la mayor acumulación en tejidos.
- ❖ (Durán, 2010) analizó por metales pesados los suelos de la mina Carolina, ubicada en el Distrito de Hualgayoc, Provincia de Cajamarca (Perú) y los suelos de la mina Les Masies de Poblet (España) y evaluó contenido de metales pesados de las plantas recolectadas alrededor de las minas.

Con respecto a las plantas recolectadas alrededor de la mina Carolina Los resultados fueron:

- En cuanto a *Bidens triplinervia*: Esta planta acumula en sus tejidos grandes de metales pesados, como el plomo Pb (50000 mg/kg) y el zinc Zn (10000 mg/kg), en la raíz. Así como como el factor de bioacumulación (BF), y el factor de transferencia (FT) son menores a uno; a excepción de los suelos levemente contaminados (Hg_0) que presentan un BF mayor que 1.
- Respecto a *Plantago orbignyana*: Esta especie tiene una gran capacidad de acumulación de Pb (7000 mg/kg) y Zn (9700 mg/kg). Para el Pb, tanto el BF como el FT son mayores a uno. En el caso del Zn, solo el FT es superior a uno.

- Viendo al *Lepidium bipinnatifidum*, *Senecio sp*, *Lepidium bipinnatifidum*, *Sonchus oleraceus* y *Baccharis latifolia*. Estas plantas acumularon grandes concentraciones de *Pb* en la parte aérea. Es más, presentaron valores de FT superiores a uno. A pesar de presentar un valor inferior a 1 en el índice BF, estas plantas se pueden emplear como plantas hiperacumuladoras de plomo.

Con respecto a los resultados obtenidos de las plantas recolectadas alrededor de la mina Les Masies de Poblet se obtuvieron los siguientes resultados.

- Respecto a la *Cistus salvifolius*, esta planta acumula elevados contenidos de Al, con valores superiores a 3000 mg/kg. Presentando valores FT superiores a uno. A pesar de presentar un valor inferior a 1 en el índice BF.
- Los bajos contenidos de Cu, menores a 10 mg/kg, que se presentaron en la raíz de *Dactylis glomerata* que crecieron en suelos con altos contenidos de cobre (valores superiores a 500 mg/kg) confirman la capacidad de esta planta de desarrollarse en suelos con elevados contenidos de este metal, y el bajo contenido de Cu en las raíces indica que esta especie excluye este metal en la rizosfera.

Con respecto a las plantas recolectadas alrededor de la mina Carolina las conclusiones los que se llegaron fueron:

- Los suelos estudiados contienen altos contenidos de metales pesados.
- Las plantas *Senecio sp*, *Bidens triplinervia*, *Plantago orbignyana* *Sonchus oleraceus*, *Lepidium bipinnatifidum* y *Baccharis latifolia* tienen la capacidad de desarrollarse en suelos con un alto contenido de metales pesados y tienen la habilidad de acumularlos en sus tejidos.

- En cuanto a *Bidens triplinervia* El estudio indica que esta planta es una especie excluyente y recomienda realizar estudios de fitoestabilización de metales pesados en esta zona andina.
- Respecto a *Plantago orbignyana*., el estudio sugiere a esta especie como hiperacumuladora de Pb y Zn.

Con respecto a las conclusiones obtenidos de las plantas recolectadas alrededor de la mina Les Masies de Poblet.

- Los contenidos en metales en los suelos de los alrededores de la mina superan los valores estándar de referencia, excepto en el caso del estroncio (Sr) que es ligeramente menor.
- El contenido de metales pesados en las plantas de *Polypodium vulgare*, *Ruscus aculeatus*, *Viburnum tinus* y *Dactylis glomerata* tienen una relación directamente proporcional con las concentraciones de dichos metales en el suelo.
- En cuanto a *Cistus salvifolius* se sugieren como plantas hiperacumuladoras de Al.

A nivel nacional se tienen las siguientes investigaciones relacionadas con la fitorremediación de suelos se tienen:

- ❖ (Argota, Encinas, Argota, & Lannacone, 2014) en sus estudios determinaron los coeficientes biológicos de fitorremediación en suelos de relave mineros que contenían Pb y Cd asimilables, utilizando las plantas *Alopecurus magellanicus bracteatus* y *Muhlenbergia angustata* (Poaceae) en Ananea, Puno, Perú. En el periodo de marzo a agosto del 2013, en su metodología ha seleccionado diez puntos de muestreo próximos a una zona minera de Ananea-Puno, Perú. Los metales analizados fueron cuantificados mediante espectrometría por plasma inductivamente acoplado. Para evaluar el potencial de fitorremediación se determinaron tres coeficientes biológicos: factor de remediación –RC, coeficientes de absorción

biológico- BAC, y factor de translocación - BT y de *M. angustata* y *magellanicus bracteatus*.

Como resultado obtuvieron:

- No se hallaron diferencias en la RC, BT y BAC del Cd y Pb entre *M. angustata* y *A. Magellanicus bracteatus*.
- No se observaron diferencias para el BAC entre el Cd y Pb.
- Se notaron diferencias en la hoja, raíz, en cuanto al RC y el BT entre el Cd y el Pb de ambas especies de plantas en estudio.
- No se hallaron diferencias entre la *M. angustata* A. y *Magellanicus bracteatus* en la concentración de Cd y Pb en las hojas y raíz.

Como conclusión principal los autores determinaron que el potencial de fitorremediación para ambas especies de plantas fue bajo.

- ❖ (Ortiz & Aranibar, 2015) Identificaron y categorizaron las plantas metalofitas. La búsqueda de plantas fue en una superficie de 10m x 10m, en cambio, el muestreo de suelo y plantas se hizo en un pie cúbico del sustrato suelo-raíz (15cm x 15cm x 15cm). La identificación de las especies vegetales se hizo usando claves dicotómicas y/o descriptivas de los géneros: *Margyricarpus*, *Stipa*, *Muhlenbergia*, *Alopecurus*, *Aciachne*, *Festuca*, *Baccharis*, *Azorella* y *Senecio*; en cambio, las especies superiores se fundamentan en el sistema integrado de clasificación de plantas con flores y la categorización de plantas se procesó a través del paquete estadístico SAS.

Los resultados que llegaron fueron:

- Los autores identificaron hasta 13 especies de plantas acumuladoras de metales, agrupadas en cuatro familias: *Poaceae*, *Apiaceae*, *Rosaceae* y *Asteraceae*,

Las conclusiones del trabajo de investigación fueron:

- Las Rosaceae y las Apiaceas son especies nuevas para la biodiversidad de pseudometalofitas en los relaves mineros.
- La acumulación de metales en el suelo y en las plantas fueron no homogéneas, y estuvieron condicionada por el equilibrio biológico de la zona de las raíces, las plantas durante el estudio mostraron mecanismos de fitoestabilización;
- La concentración de metales en raíces determinada por los mecanismos de Fito extracción y es variable,
- ❖ (Venegas, 2016) en su estudio manifiesta que las plantas vegetales pueden presentar diversas formas o estrategias para descontaminar el suelo, como es el caso de la planta *Stipa ichu*, planta que dio resultado con mayor efectividad en la absorción de plomo, de los que se encontraron el área de estudio.

Los resultados obtenidos fueron que después de los respectivos análisis de laboratorio, mostraron con una clara notoriedad de que esta planta vegetal *Stipa ichu* es una acumuladora de plomo, según el estudio absorbió hasta 310,45 mg de Pb/kg de planta, del suelo contaminado.

Como conclusión fue que el estudio confirmó la hipótesis de que las plantas nativas son las más adecuadas para fitorremediar sus propios espacios naturales.

- ❖ (Torres, 2018) determinó el factor de bioconcentración y traslocación en tres especies vegetales altoandinas, *Pennisetum clandestinum hochst*, *Medicago lupulina L.* y *Stipa ichu*, para suelos contaminados con metales pesados (Pb, Ni, Cu, Zn, y Cd) en condiciones de invernadero. Se analizaron las concentraciones totales de Pb, Ni, Cu,

Zn, y Cd en las diferentes partes de la planta (raíces, hojas y tallos) de las especies vegetales alto andinas, así como en los suelos donde se desarrollaron.

Como resultado en la investigación:

- Se obtuvo el orden de mayor absorción por las plantas de la siguiente manera $Pb > Zn > Cu > Cd > Ni$, de acuerdo al estudio se categorizaron como plantas fitoextractoras el *Pennisetum clandestinum* y el *Stipa ichu* por obtener un $FT = 1.66$ y $FBC = 1.62$ y $FT = 1.15$ y $FBC = 1.07$ y, respectivamente.
- El *Medicago lupulina* L. obtuvo resultados de un $FT = 1.18$ y $FBC = 2.13$ por lo se categorizó como una planta fitoextractora para suelos contaminados con metal Zinc, por tener un FT y FBC mayores a uno.

En la tesis se llegó a las siguientes conclusiones:

- El *Medicago lupulina* L. y actúa como una planta fitoestabilizadora para el Zn, Cd y Ni.
- El *Stipa ichu* (Ruíz y Pav.) Kunth, *Pennisetum clandestinum* Hochst ex Chiov y *Medicago lupulina* L., actúan como una planta fitoextractora para suelos contaminados con Ni, Pb, Zn y Cd.
- ❖ (Corpus, 2016) evaluó la eficiencia fitorremediadora de: *Festuca glycerantha* Pilg, *Cortaderia jubata* (Lemoine) Stapf, y *Calamagrostis recta* (Kunth) Trin. Ex Steud., para suelos contaminados con metales pesados procedentes de la Planta Concentradora de Minerales Santa Rosa de Jangas en condiciones de invernadero, este autor evaluó la biomasa de las tres especies, así como, la concentración en el suelo, la raíz y los tallos y hojas, la capacidad de acumulación y el factor de distribución en los diferentes partes de la planta; de cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo

(Pb) y zinc (Zn) para las tres especies expuestas a suelo con metales pesados y suelos de antecedentes mineros; para lo cual se realizó el análisis químico de las muestras, el cálculo del Factor de Bioconcentración (BCF) y Traslocación (TF). Para *Festuca glyceriantha* Pilg. *Calamagrostis recta* Trin. Ex Steud., y *Cortaderia jubata* (Lemoine) Stapf

Como resultados se tiene lo siguiente:

- La autora determinó que la mayor concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn se presentó en el suelo sustrato y su menor concentración en la parte aérea tanto para el grupo T₁ (suelo con metales pesados) como para el grupo T₂ (suelo de mina).
- El factor de bioconcentración (BCF) en la raíz y parte aérea y el factor de traslocación (TF) de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en *Festuca glyceriantha* Pilg, *Calamagrostis recta* (Kunth) Trin. Ex Steud. y *Cortaderia jubata* (Lemoine) Stapf. fue menor a 1 para el grupo T₂ (suelo de mina).

Del estudio se concluyó que:

- Que La *Festuca glyceriantha* Pilg, *Calamagrostis recta* (Kunth) Trin. Ex Steud., y la *Cortaderia jubata* (Lemoine) Stapf tienen una buena capacidad de propagación, por el porcentaje de germinación obtenido 28%, 51%, 39% respectivamente, y por su crecimiento, llegando a alcanzar en el sexto mes 29.4 cm, 46.3 cm, y 43.5 cm respectivamente.
- Como segunda conclusión, La *Festuca glyceriantha* Pilg. *Calamagrostis recta* (Kunth) Trin. Ex Steud., y *Cortaderia jubata* (Lemoine) Stapf. mostraron una alta eficiencia fitorremediadora por el mecanismo de fitoestabilización.

2.3 Bases Teóricas.

2.3.1 *El mercurio en el suelo como contaminante.*

El suelo es un componente importante del medio ambiente, que no puede ser aislado del medio que lo rodea, ya que interactúa con él. El suelo está presente en la mayoría de los ecosistemas terrestres como el medio físico químico en el que se desarrolla la vida, por ello, un uso no adecuado del mismo, contribuye a la degradación de este recurso natural. Los efectos de los metales pesados como el mercurio en el suelo ocasionan la degradación del suelo y la reducción de nutrientes que se pueden perder (Garcia & Dorronsoro, 2005).

2.3.1.1 *Movilización de metales pesados en el suelo.*

La contaminación del suelo por metales pesados está principalmente relacionada con diferentes tipos de actividades humanas (Pagnanell, 2011). Una vez que los metales pesados se encuentran en el suelo, pueden retenerse en el suelo, pero también pueden movilizarse a través del suelo mediante de diversos mecanismos biológicos y químicos. Los metales pesados que se agregan a los suelos se redistribuyen lentamente y se distribuyen entre los componentes de la fase sólida del suelo. (Han, 2003). Esta redistribución se caracteriza por una retención inicial rápida y posteriores reacciones lentas, dependiendo de los tipos de compuestos del metal, propiedades del suelo, nivel de introducción y tiempo. La movilidad relativa de los elementos traza (metales) en suelos es de suma relevancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los diferentes perfiles del suelo al agua subterránea y difiere de si su origen es natural o antrópico y, si es antrópica al tipo de fuente. Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de

cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica y textura. (Sauquillo, 2003).

2.3.1.2 *El mercurio como contaminante.*

El mercurio está presente en forma natural en el ambiente y existe en varias formas. Estas formas se pueden clasificar en tres tipos: mercurio metálico (llamado también mercurio elemental), mercurio inorgánico y mercurio orgánico. El mercurio metálico es un metal brillante de color blanco-plateado se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente. El mercurio metálico es la forma elemental o la forma pura de mercurio (no está combinado con otros elementos). El mercurio metálico es usado en termómetros y en algunos interruptores eléctricos. A temperatura ambiente, alguna cantidad de mercurio metálico se evapora al aire y forma vapores de mercurio. Los vapores de mercurio son incoloros e inodoros. Mientras más alta es la temperatura, más vapores se liberarán del mercurio metálico líquido (Toxicas, 1999).

2.3.1.3 *Propiedades fisicoquímicas del mercurio*

El mercurio es un metal cuyo símbolo químico es Hg, se ubica en el grupo IIB (metales de transición) en la tabla periódica. El mercurio posee una alta volatilidad que le permite su presencia en la atmósfera en forma de mercurio elemental en estado gaseoso, y posee una baja solubilidad en agua, también existen sales de mercurio volátiles como el cloruro de mercurio (HgCl_2) pero éstas son solubles en agua lo que provoca que se depositen en el suelo o aguas mucho más rápido, disminuyendo su tiempo de residencia en la atmósfera. (Garcia & Dorronsoro, 2005)

Los estados de oxidación del mercurio son tres: 0 (elemental), I (mercurioso) y II (mercúrico). Los estados de oxidación mercúrico y mercurioso forman un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos y que son las formas en las que se encuentra el mercurio en el medio ambiente. También se encuentra este metal en estado puro, es decir, como metal líquido, pero no es frecuente. (Pagnanell, 2011)

En los estados de valencia mercúrico y mercurioso se pueden formar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, siendo los compuestos inorgánicos de mercurio los más comunes en el medio ambiente como son: Hg (II), HgCl_2 , $\text{Hg}(\text{OH})_2$ y HgS ; mientras que los compuestos orgánicos son el metilmercurio (CH_3Hg), cloruro de metilmercurio (CH_3HgCl) y etilmercurio (CH_3HgOH); y en menores proporciones otros organomercuriales como dimetilmercurio (CH_3HgCH_3) o fenilmercurio. (García & Dorronsoro, 2005).

2.3.2 Factores que determinan la acumulación del Mercurio en el suelo.

La cantidad de mercurio que se acumula en los suelos depende de muchos factores fisicoquímicos como son el pH, Eh, materia orgánica, iones cloro y óxidos de Fe y Mn. (Adriano, 2001).

2.3.2.1 PH

El pH es uno de los factores más importantes, afecta a la conformación de compuestos y a la estabilidad del mercurio en el suelo, esto queda registrado en la Figura 4.

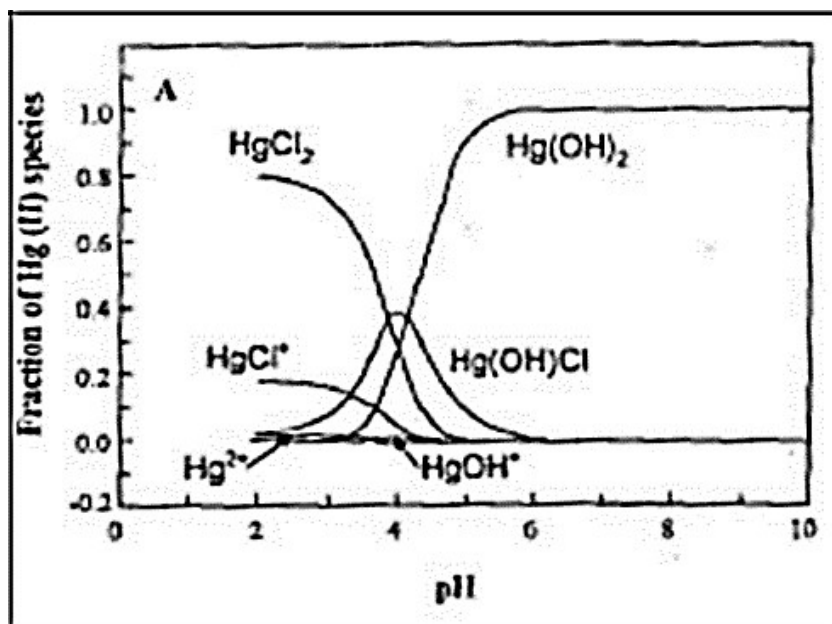


Figura 4: Especiación del Hg(II) en función del pH. (Adriano, 2001)

En la figura 4 se aprecia que en suelos en donde las concentraciones de Cl^- están comprendidas entre 1×10^{-6} y 1×10^{-5} M, la mayoría de las especies están cargadas positivamente a pH bajo (por ejemplo: HgCl^+ y Hg^{2+}) y neutra (HgCl_2). A medida que va aumentando el pH las formas predominantes son las hidroxiladas. En suelos con margas y calizas a los que se le añaden HgCl_2 , la reducción de las sales de Hg^{2+} a Hg^0 aumenta, elevándose de este modo las pérdidas del mercurio por volatilización cuando el pH sube de 5,3 a 6,4. (Adriano, 2001).

2.3.2.2 Potencial redox.

El potencial redox al igual que el pH, determina la naturaleza de especies en el suelo, quedando demostrado en la Figura 5.

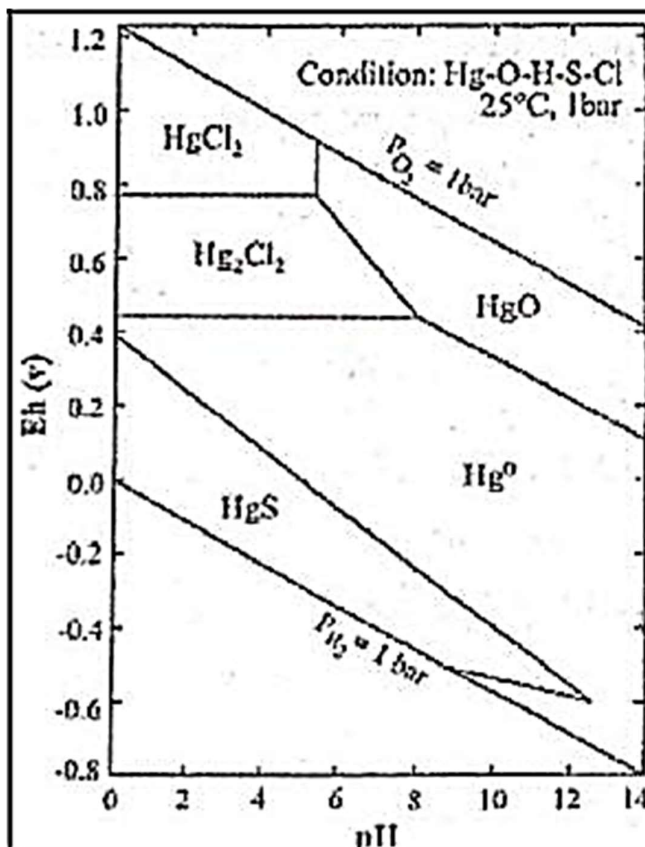


Figura 5: Estabilidad del mercurio según Eh-pH. (Adriano, 2001)

En condiciones naturales de oxidación de potencial redox (Eh) y pH, la solubilidad del mercurio está principalmente constituida por Hg_0 , $\text{Hg}(\text{OH})_2$, y HgS . En condiciones moderadas de oxidación por encima de un pH 5, la especie dominante del mercurio en solución es el Hg_0 disociado. Si las condiciones del medio son ligeramente reductoras el mercurio puede precipitar como sulfuro (HgS), que poseen una solubilidad muy baja, pero, si el ambiente reductor es muy fuerte, la solubilidad aumenta por conversión del ion mercúrico a metal libre o por existencia de HgS_2 estable a pH elevados. En los suelos, se necesita que se den buenas condiciones reductoras para la formación del metilmercurio. Aunque se determinó que la formación de metilmercurio se forma en un mayor porcentaje en un sistema oxidante acuoso que en uno reductor. Sólo se producen

altos grados de solubilidad del mercurio en ambientes muy oxigenados (+350 mv) como consecuencia de la fuerte tendencia del Hg (II) a asociarse con hidróxidos e iones cloruro. (Adriano, 2001).

2.3.2.3 Materia orgánica y arcilla

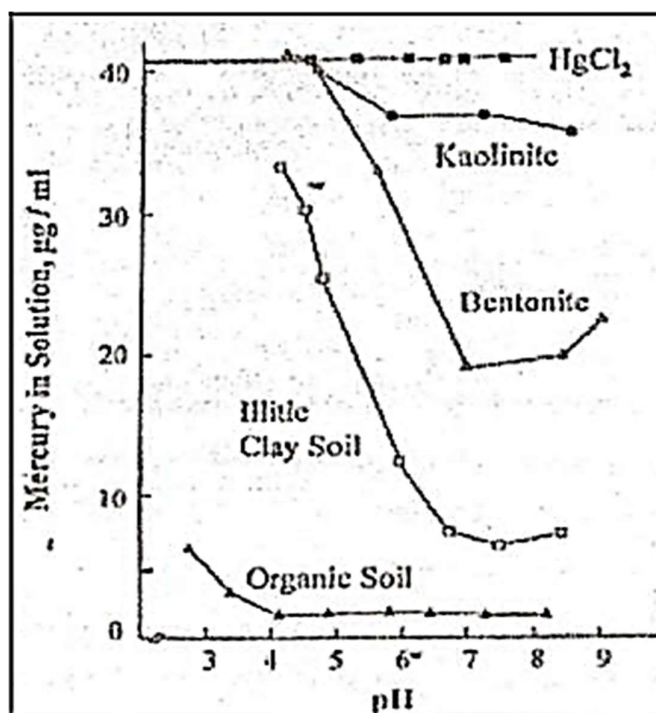


Figura 6: Retención del mercurio en diferentes componentes del suelo influenciados por el pH. (Adriano, 2001).

En la figura 6 se muestra que la concentración de mercurio en el suelo se relaciona con la concentración de Cloro, pero también en gran medida está influenciada, por los niveles de Carbono y Azufre del suelo, a causa de que el mercurio tiene una alta afinidad para formar enlaces con ellos. Por eso, el mercurio aparece en varios minerales, pero el más importante y frecuente es el cinabrio (HgS). Investigaciones realizadas determinaron que suelos con

altos contenidos en materia orgánica o arcillas generalmente poseen mayores cantidades de mercurio.

Normalmente los suelos orgánicos tienen mayores cantidades de mercurio que los minerales debido principalmente a la gran cantidad de enlaces que se crean entre el humus y dicho metal, se observa que las pérdidas en suelos de mercurio por volatilización son menores si éstos tenían cierto contenido en materia orgánica, de este modo es común que el mercurio se acumule en los horizontes superficiales del suelo (existiendo excepciones). la concentración de mercurio disminuye poco a poco en los primeros 20 cm de suelo, para después llegar a estabilizarse con la profundidad. Un factor para tener en consideración son las precipitaciones ya que provocan una disminución de la concentración de mercurio en la capa orgánica superficial y un aumento en las capas más profundas, como resultado de procesos de lixiviación. (Warren, Glor, & Turelli, 2010)

Esta fuerte afinidad del mercurio con la materia orgánica parece incrementarse con la acidez del suelo ($\text{pH} < 4$) mientras que a mayores pH ($\text{pH} > 5,5$) los óxidos de Fe y minerales de la arcilla adquieren una mayor importancia Respecto a las arcillas su mineralogía es determinante en la absorción del mercurio en el suelo, siendo la illita la que posee mayor capacidad frente a la caolinita que es la que menos sorbe. (Warren, Glor, & Turelli, 2010).

2.3.3 *El Ichu (Stipa ichu Ruiz & Pav).*

El ichu (*Stipa ichu* Ruiz & Pav) es una gramínea perenne perteneciente a la familia Poaceae. Su crecimiento es vertical y de forma agrupada, con follaje verde, tornándose amarillo a finales del otoño. La inflorescencia es racimosa, con flores blancas o plateadas que nacen desde la base, como si fueran espigas que cuelgan. El ichu es un pasto propio del altiplano andino

suramericano y de algunos países centroamericanos, como México y Guatemala. Esta especie recibe diversos nombres, entre los que se encuentran aguja de hierba peruana, paja brava, siguya ichu, pecoya, paja de puna y plumero peruano. (Marrero, 2019)

Características.

El *Stipa ichu* es una planta herbácea que crece vertical y en grupo, formando macollas. Su tallo mide aproximadamente entre 60 y 180 centímetros, teniendo cada uno más de 3 nudos. Los nudos pueden tener o carecer de pelos, mientras que los entrenudos tienen pelos y son de textura áspera. (Marrero, 2019).

Hojas.

Las hojas son filiformes y rígidas, con una base glabra. De largo suelen tener entre 30 y 60 centímetros y de ancho miden menos de 4 milímetros. En el cuello tienen pelos de alrededor de 1 milímetro de largo y en la unión entre el limbo foliar y la vaina poseen una membrana de 2 milímetros de largo. El limbo o lámina está plegado o tiene los bordes doblados hacia la parte interna. Dicha estructura es de textura áspera, o pudiera tener pelos en el haz. (Marrero, 2019).

Flores.

Las espiguillas, sobre las que se encuentran las flores, tienen el pedicelo corto. Las flores son hermafroditas y tienen glumas púrpuras o hialinas. El largo de estas es de 6 a 10 milímetros y miden alrededor de 1 milímetro de ancho. Son trinervadas y se encuentran largamente acuminadas. Las brácteas son fusiformes, midiendo entre 2 y 3,5 milímetros de largo. Son de color café claro y tienen pelos blancos. Las aristas, que se extienden desde el lema,

son largas, flexuosa y puede ser glabra o escabrosa. (Marrero, 2019).

Taxonomía.

Reino	: Plantae.
División	: Magnoliophyta.
Clase	: Liliopsida.
Orden	: Poales.
Familia	: Poaceae.
Subfamilia	: Stipoideae.
Tribu	: Stipeae.
Género	: Stipa
Especie	: Stipa ichu.(Ruiz & Pav)

Hábitat y distribución.

Stipa ichu Ruiz & Pav es autóctono y propio de Centroamérica está presente en los países de Costa Rica, México, Guatemala y el Salvador. En Suramérica es endémico en Venezuela, Ecuador, Colombia, Perú, Argentina y Bolivia. Se encuentra de manera abundante a una altura entre 3700 y 4800 msnm. Allí, en áreas abiertas, forma extensos pajonales. Esta especie puede crecer en quebradas empinadas, laderas de montañas, pampas, lomas y a las orillas de los ríos. En dichas regiones, el suelo es fértil y húmedo. Donde el agua puede discurrir libremente, ya que no se desarrolla en tierras inundadas. El ichu es parte de la vegetación de la región Puna, ubicada en el área altiplánica central de la cordillera andina. También se encuentra en los claros de los bosques y en algunos lugares deforestados por el hombre, como los pastizales secundarios y en las orillas de los caminos, carreteras o de las parcelas. El hábitat del *Stipa ichu* Ruiz & Pav

puede encontrarse desde las planicies mexicanas, con un clima desértico y cálido, hasta las altas montañas de Perú, una zona de bajas temperaturas y gran altitud. Esta característica que es propia de la especie le otorga una condición de adaptabilidad y gran resistencia y que favorece su desarrollo. (Marrero, 2019).



Figura 7: El *Stipa ichu* Ruiz & Pav

Cuidados.

La planta puede ser sembrada, en los bordes de los pasadizos de los jardines, en patios y en parques. Se recomienda sembrar entre 3 y 5 plantas por metro cuadrado. El suelo debe estar nutrido y no ser inundable. El drenaje es sumamente importante para el desarrollo de *Stipa ichu* Ruiz & Pav por lo que se recomienda que la tierra esté mezclada con una porción de arena, evitando así su compactación. El sitio de sembrado debe estar expuesto a la luz directa del sol, o estar bajo poca sombra. Su riego debe ser moderado,. (Marrero, 2019).

2.3.4 Chilliwa (*Festuca dolichophylla* J. Presl).

Son plantas herbáceas perennes con una altura de 10 a 200 cm (4-79 pulg) y una distribución abundante, que se produce en todos los continentes excepto en la Antártida. El género está estrechamente relacionado con el raigrás (*Lolium*), y la evidencia reciente de estudios filogenéticos que utilizan la secuenciación del ADN mitocondrial de la planta muestra que el género carece de monofilia. Debido a que la taxonomía es compleja, no está claro cuántas especies verdaderas pertenecen al género, pero las estimaciones van desde más de 400 hasta más de 500. Es endémica de Costa Rica, Panamá, Bolivia, Chile, Argentina, Colombia, Ecuador, Perú, donde se encuentra en páramos, laderas abiertas con cenizas volcánicas, a una altitud de 3 000 - 3 400 metros. (Marcera, 2019)

Taxonomía.

Reino	: Plantae.
Clase	: Liliopsida.
Orden	: Poales.
Familia	: Poaceae.
Género	: Festuca
Especie	: <i>Festuca dolichophylla</i> J. Presl.



Figura 8: Festuca dolichophylla J. Presl

2.3.5 Remediación de los suelos contaminados con Hg.

Una vez que los metales pesados contaminan los suelos, es difícil eliminarlos completamente. El mercurio es persistente y volátil debido a sus especiales propiedades físicas y químicas. Puede entrar en el suelo a través de muchas vías y puede existir en el suelo en diferentes formas, causando una grave contaminación del suelo. Por lo tanto, el tratamiento y la remediación de la contaminación por Hg en el suelo han recibido mucha más atención. Las propiedades físicas y químicas del suelo y la presencia de Hg son factores importantes que afectan a la eficiencia de la remediación. Por lo tanto, debe adoptarse una tecnología de remediación apropiada en función de las propiedades del suelo y las características morfológicas del Hg en el suelo. (Teng, et al., 2020). Hay dos mecanismos de tecnología de rehabilitación para los suelos contaminados con Hg:

- 1) Eliminar las sustancias nocivas del suelo para reducir la concentración total de remediación del Hg.

2) Modificar la movilidad y la disponibilidad biológica del Hg en el suelo para reducir el riesgo de contaminación.

2.3.5.1 *Remediación biológica*

La remediación biológica/biorremediación es un método que reduce, elimina o inmoviliza los contaminantes nocivos del suelo y lo purifica mediante el uso de productos biológicos. La biorremediación se divide principalmente en dos categorías: la remediación vegetal y la remediación microbiana, en la que el desarrollo de la remediación vegetal ha recibido mucha más atención. (Teng, et al., 2020).

2.3.5.2 *Fitorremediación del Hg.*

La fitorremediación es la aplicación de plantas y sus microorganismos rizosféricos asociados para eliminar, degradar o inmovilizar contaminantes en los suelos, así como en los sedimentos y en las aguas subterráneas y superficiales. (Lui, et al., 2020).

Cuando la tecnología de fitorremediación se aplica a la rehabilitación de suelos contaminados con Hg, el Hg se transporta desde las raíces hasta la parte superior de la planta a través de una estructura organizativa pertinente de la planta, las raíces de la planta absorben el Hg. Durante todo el proceso de absorción y transporte, el Hg interactuará con cada parte de la planta en cierta medida, y algunas plantas específicas pueden eliminar Hg en el suelo mediante estas acciones para la remediación del suelo.

Fitovolatilización del Hg.

La fitovolatilización se refiere al uso de las plantas para absorber los contaminantes del suelo, convirtiéndolos en formas volátiles y

liberándolos en la atmósfera, este proceso es la volatilización de los contaminantes o metabolitos mediante el uso de plantas. La fitovolatilización elimina principalmente algunos contaminantes volátiles del suelo. Basándose en la volatilidad del Hg, esta tecnología puede utilizarse para remediar el suelo contaminado con Hg. El Hg del suelo es absorbido y transformado por las plantas y luego se volatiliza a la atmósfera en forma de Hg gaseoso. Esta tecnología suele combinarse con la ingeniería genética. El gen de Hg invertasa se introduce en una planta objetivo por medio de la ingeniería genética para que la planta pueda convertir el Hg combinado en Hg de valencia cero y liberarlo a la atmósfera a través de las hojas. Dos genes, merA y merB, están relacionados con la acumulación y transformación del Hg. Cuando estos dos genes se expresan en las plantas, el Metil Hg puede transformarse en Hg elemental y luego se evapora a la atmósfera a través de las hojas. Sin embargo, la volatilización de las plantas transfiere el Hg del suelo a la atmósfera. El riesgo potencial de contaminación atmosférica por Hg aún no ha sido resuelto, por lo tanto, la volatilización de las plantas no ha sido ampliamente utilizada en la remediación práctica. (Teng, et al., 2020)

Fitoestabilización.

La fitoestabilización utiliza principalmente las raíces de las plantas para limitar la movilidad y la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo y se produce mediante procesos bioquímicos que tienen lugar en las raíces o en el vecindario de las raíces. La fitoestabilización remedia el suelo contaminado principalmente mediante la adsorción, la precipitación, la complejación o la reducción de la valencia metálica. En esencia, la tecnología de fitoestabilización no reduce la cantidad de Hg en el suelo; sólo cambia la forma del Hg para que se acumule y precipite en las raíces, lo que reduce la movilidad del Hg en el suelo (Teng, et al., 2020).

Fitoextracción.

La fitoextracción se refiere al uso de las plantas para captar metales del suelo a través de las raíces y traspasarlos a las partes de la planta que están por encima del suelo; luego, los metales se recuperan de las partes cosechables de las plantas. De acuerdo con este principio de remediación, las plantas seleccionadas para esta tecnología suelen ser plantas hiperacumuladoras. Las plantas hiperacumuladoras pueden absorber metales pesados y transportarlos a las partes superficiales. Por lo general, tienen características de acumulación y almacenamiento de metales pesados en concentraciones mucho mayores que las de las plantas no hiperacumuladoras que crecen en el mismo hábitat. (Teng, et al., 2020)

2.3.5.3 *Remediación microbiana.*

Los microbios son omnipresentes en el medio ambiente y tienen un efecto superior en los sitios contaminados con metales pesados, por lo que desempeñan un papel vital en la conversión de los metales pesados tóxicos en formas no tóxicas. Los microorganismos resistentes a los metales pueden utilizarse como agentes de biorremediación. En estudios anteriores se ha demostrado que los microorganismos pueden restablecer el medio ambiente mediante diversos métodos, como la "unión, inmovilización, oxidación, transformación y volatilización de los metales pesados". En los estudios se ha comprobado que los microorganismos tolerantes al Hg con un mer operón pueden controlar eficazmente la contaminación por Hg en el medio ambiente. Hay algunos mer operones en el genoma de las bacterias resistentes al Hg, incluidos ciertos genes funcionales, así como promotores, genes reguladores y operadores. Los genes funcionales más comunes son merA y merB, que codifican la reductasa de Hg ión y la Hg liasa orgánica. Con la ayuda de la

reductasa, la liasa puede reducir los compuestos orgánicos de Hg altamente tóxicos a Hg volátil casi no tóxico.

2.3.6 Fitorremediación del Hg asistida químicamente.

La tecnología de fitorremediación tiene algunas desventajas, como la de no poder aplicarse a suelos muy contaminados, donde el Hg interfiere en el proceso metabólico de las plantas y dificulte su crecimiento, y donde el tiempo de remediación sea prolongado. Por lo tanto, muchos investigadores han utilizado medidas de ayuda o de mejora. Las medidas asistidas por productos químicos se utilizan generalmente para mejorar la eficiencia de la fitorremediación. (Lui, et al., 2020)

Hay cinco formas de Hg que son: intercambiables (EX), ligadas al carbonato (CB), ligadas a los óxidos de Fe-Mn (OX), ligadas al material orgánico (OM) y fracciones residuales (RS). La biodisponibilidad de las cinco formas sigue el orden de $EX > CB > OX > OM > RS$. Algunos aceleradores químicos pueden transformar el Hg no biodisponible en fracciones biodisponibles, la adición de ioduro de potasio (KI) podría aumentar la biodisponibilidad del Hg en los suelos contaminados con Hg, lo que podría promover la fitoextracción de los suelos contaminados con Hg, a pesar de que concentraciones demasiado altas podrían ser tóxicas para la planta. (Lui, et al., 2020)

La mayor acumulación de Hg de las raíces de *Brassica juncea* es estimulada por el sulfato de amonio $((NH_4)_2SO_4)$, el tiosulfato de amonio $((NH_4)_2S_2O_3)$ y el sulfito de sodio (Na_2SO_3) han facilitado sustancialmente la absorción de Hg y el TF de Hg por *Brassica juncea* (Lui, et al., 2020). Otros investigadores afirmaron que el $(NH_4)_2S_2O_3$ podía aumentar la solubilidad total del mercurio (THg) e incrementar la capacidad de fitoextracción de *C. glaucum* L., *Poa annua*, *Brassica juncea* y *Helianthus annuus*. (Lui, et al., 2020).

La adición de ácido clorhídrico (HCl) a los suelos contaminados con Hg aumenta tanto la biomasa vegetal como la acumulación de Hg en las plantas, mientras que la inclusión del EDTA provoca un aumento significativo de la acumulación de Hg en los tejidos vegetales y la disminución de la biomasa. Se demostró que la absorción de metilmercurio (MeHg) y de mercurio inorgánico (IHg) aumentó en las raíces, las hojas y los granos de arroz y al añadir fertilizante de azufre mejoró la movilidad del Hg al estimular la transformación del sulfuro de mercurio (HgS). La adición de azufre podría mejorar la formación de compuestos de tiol, lo que es importante para la desintoxicación del Hg. (Lui, et al., 2020)

Algunos investigadores informaron de que la materia orgánica desempeñaba una función de fitorremediación ya que interactuaba con el Hg en la rizosfera, restringiendo la transferencia de cationes a las raíces de las plantas. (Lui, et al., 2020).

Hay algunas limitaciones para las fitorremediaciones asistidas por químicos. Una cantidad de Hg biodisponible transformada de Hg no biodisponible mediante el uso de aceleradores químicos puede causar un riesgo de contaminación en el suelo y en las aguas subterráneas. Además, algunos aceleradores químicos pueden ser tóxicos para las plantas y algunos no se descomponen, lo que puede ser adverso para el medio ambiente del suelo. Algunos investigadores informaron de que el EDTA era caro y malo en cuanto a la degradabilidad biológica. Por lo tanto, la dosis y la frecuencia de los aceleradores químicos son apropiadas para los suelos contaminados con Hg específicos y las plantas de remediación específicas.

3 METODOLOGÍA.

3.1 Tipo y Diseño de la Investigación.

El tipo de investigación que se desarrolló fue del tipo experimental debido a que se manipularon las variables $X =$ (Fitorremediación con *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla* usando tiosulfato y yoduro de potasio) que son las causas, sobre $Y =$ (contenido de mercurio en los suelos contaminados) como efecto.

La metodología utilizada en el trabajo fueron los diseños experimentales, ya que se trabajó con condiciones controladas utilizando un diseño factorial que tuvo como variables de respuesta la concentración de mercurio total (HgT) en tejidos vegetales y suelo, y como factores: **contaminación del suelo** (con 3 niveles: suelo contaminado sin químico, suelo contaminado con acelerador químico C_1 , suelo contaminado con acelerador químico C_2), y **el tiempo de crecimiento de la planta** (4 niveles: mes 0, mes 3, mes 6, y mes 9).

Se hizo también un tratamiento control que consistió en el sembrío de plantas en un suelo sin historial minero (con muy baja concentración de Hg, tendencia a 0 mg/kg), con el fin de establecer las diferencias en las características fito-tóxicas con las plantas expuestas a altas concentraciones de Hg, dado que en las plantas sembradas en el suelo control no genera acumulación ni remoción del metal del suelo.

El número de repeticiones (plantas) por combinación de niveles de factores fue de 3, por lo que se sembraron 18 plántulas de *Stipa ichu* en cada uno de los suelos contaminados de manera aleatoria y 18 plántulas de *Festuca dolichophylla*. Fueron tres tipos de suelos (contaminado sin químico, contaminado con químico C_1 y contaminado con químico C_2) y como fueron dos sustancias químicas (tiosulfato de amonio y yoduro de

potasio) la cantidad necesaria fue de 36 plántulas de *Stipa ichu* y 36 plántulas de *Festuca dolichopylla*.

Las muestras vegetales fueron tomadas cada tres meses hasta los 9 meses de crecimiento y se llevaron al laboratorio para la determinación de mercurio total (HgT) en la biomasa. También se determinó la concentración de HgT y mercurio biodisponible en los suelos, antes y después del tratamiento con plantas (cada tres meses) para determinar el porcentaje de remoción del contaminante del suelo.

3.2 Unidad de análisis.

Las unidades de análisis estuvieron dadas por la combinación de los 2 factores (contenido de Hg en el suelo, y tiempo de tratamiento con plantas) el primero con 3 niveles y el segundo con 4 niveles, por lo que se tuvo cuatro diseños factoriales 3 x 4. Como se describe a continuación:

- Primer diseño factorial *Festuca dolichopylla* con tiosulfato de amonio.
- Segundo diseño factorial *Festuca dolichopylla* con ioduro de potasio
- Tercer diseño factorial *Stipa ichu* con tiosulfato de amonio
- Cuarto diseño factorial *Stipa ichu* con ioduro de potasio.

En total se tuvieron 24 unidades de análisis para el *Stipa ichu* y 24 unidades de análisis para la *Festuca dolichophylla*. Los cuales se detallan en el siguiente cuadro:

Cuadro 2: Combinaciones de factores (por cada diseño factorial.

	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado con tratamiento químico C ₁	Suelo contaminado con tratamiento químico C ₂
0 mes	U(0,2)	U(0,3)	U(0,4)
3 mes	U(1,2)	U(1,3)	U(1,4)
6 mes	U(2,2)	U(2,3)	U(2,4)
9 mes	U(3,2)	U(3,3)	U(3,4)

3.3 Población de estudio.

La población de estudio fueron las muestras de suelo contaminado con mercurio traídos del distrito de Ananea que estuvieron en influencia directa con las actividades mineras informales.

En total se extrajeron 18 kg de suelo para la *Festuca dolichopylla* J. Presl y 18 kg para el *Stipa ichu* Ruiz & Pav con un exceso de 50% para suplir las mermas que se produjeron, durante el traslado.

Las muestras de suelo que se utilizaron como materia prima del proceso experimental fue el compósito de los tres lugares de muestreo previamente homogenizas y mezcladas.

3.4 Tamaño de muestra.

De acuerdo a los diseños experimentales establecidos se necesitaron 1 kilo de suelo por unidad de análisis, pero se prepararon por triplicado (3 muestras por unidad de análisis) por ser la configuración mínima recomendada para los diseños factoriales. (Arnau & Bono, 2017)

De acuerdo a la configuración recomendada se requirió (para las dos plantas en estudio):

- 3 kg. de suelo no contaminado zona 1

- 3 kg. de suelo no contaminado zona 2
- 3 kg. de suelo no contaminado zona 3
- 12 kg. de suelo contaminado zona 1
- 12 kg. de suelo contaminado zona 2
- 12 kg. de suelo contaminado zona 3

En total se requirieron:

9 kg. de suelo libre de contaminación.

36 kg. de suelo contaminado.

3.5 Selección de muestra.

Se extrajo las muestras de suelo de áreas impactadas directamente por actividades mineras del distrito de Ananea tomando en consideración varios factores como son la facilidad de acceso, la presencia de fuentes contaminadoras, similitud de suelo.

A continuación, se mencionan las tres áreas seleccionadas para la recolección de muestras.

Área de extracción A:

- Coordenadas de extracción : 14°40'01.0"S; 69°28'03.3"W.
- Nombre de la zona : Pampa Blanca.
- Altitud : 4841 m.s.n.m.
- Área aproximada de A : 100 Ha.

Área de extracción B:

- Coordenadas de extracción : 14°38'29.0"S; 69°27'31.41"W.
- Nombre de la zona : La Rinconada
- Altitud : 4980 m.s.n.m.
- Área aproximada de B : 5 Ha.

Área de extracción C:

- Coordenadas de extracción : $14^{\circ}40'33.0''\text{S}$; $69^{\circ}32'42.3''\text{W}$.
- Nombre de la zona : Ananea
- Altitud : 4680 m.s.n.m.
- Área aproximada de C : 20 Ha.

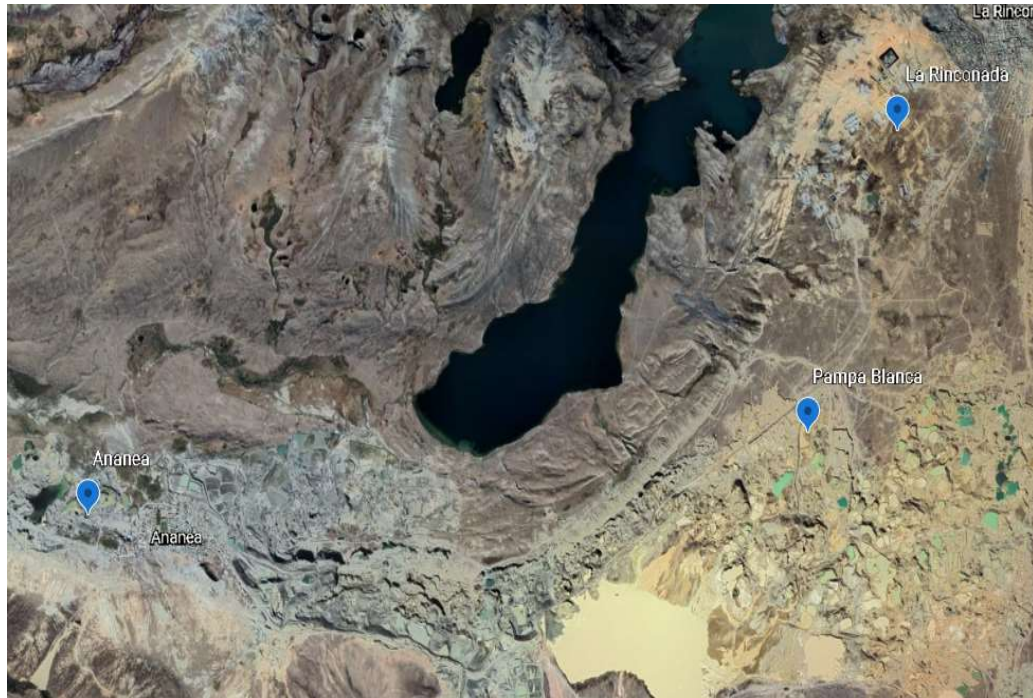


Figura 9: Puntos de muestreo.

3.5.1 Muestreo de Suelos.

Una vez que han seleccionado los lugares de muestreo, se aplicaron sondeos manuales para la toma de muestras de superficie. Este sistema es rápido de usar, relativamente fácil, con esta técnica la cantidad de suelo que se extrae es poca (Ministerio del Ambiente, 2017). El procedimiento es el siguiente:

- Se ubicó el muestreador en posición perpendicular al suelo. Previamente se retiró del suelo antes del muestreo, piedras y restos de plantas.
- Se limpió con una brocha pequeña los accesorios de muestreo y el muestreador para evitar que el equipo provoque contaminación entre las diferentes muestras.
- Se lavó con agua los accesorios de muestreo y el muestreador, cada vez que se realizaba un muestreo.
- La cantidad fue de casi un kilogramo por muestra extraída.



Figura 10: Lugar de muestreo en Ananea.

3.5.2 Procedimiento de recolección de especies vegetales:

Para la extracción de las plantas del suelo (*Stipa ichu* Ruiz & Pav y *Festuca dolichopylla* J. Presl), se seleccionó un área limpia que no

estuvo expuesta a contaminación de mercurio como son las plantas que crecen en los terrenos de la UNAJ, ubicados en la zona de Ayabacas - Juliaca, donde se realizó excavaciones con un radio de 20 cm de distancia por planta desde el tallo principal con el objetivo de proteger las raíces.

Una vez colectadas las plantas se agruparon de a dos y fueron colocadas en macetas de plástico. Las macetas se llenaron con tierra de los puntos de extracción a fin de cubrir rápidamente las raíces y protegerlas de la exposición a la luz solar.

Se colectaron 24 muestras de planta de los puntos de muestreo dependiendo de las condiciones que en ese momento se dieron en el campo. Se seleccionaron plantas de mediana edad y tamaño medio con buen crecimiento de las raíces. El traslado de las muestras se realizó teniendo cuidado de no exponer las raíces de las plantas a la luz solar.



Figura 11: Recolección de plántulas.

3.6 Técnicas de recolección de datos.

Los resultados de la investigación se obtuvieron de las variables experimentales (concentración de químico en el suelo contaminado, y tiempo de tratamiento de la planta) que se obtuvieron de los trabajos de campo y de los análisis de laboratorio, para ello fue necesario contar con la tierra contaminada representativa del ámbito de estudio y las respectivas plántulas de *Stipa ichu* Ruiz & Pav y la *Festuca dolichopylla* J. Presl

3.6.1 Preparación del sustrato para el terreno.

Se prepararon sustratos de suelo con el compósito de las muestras del suelo original traído del lugar de interés de acuerdo al diseño experimental, haciendo una mezcla homogénea con partes iguales.

3.6.2 Siembra de plántulas.

Inicialmente se trasplantaron 24 plántulas de *Stipa ichu* Ruiz & Pav y 24 plántulas de *Festuca dolichopylla* J. Presl individualmente cada una en 1 kg de suelo (unidad experimental) libre de mercurio en macetas, estas macetas se ubicaron al aire libre dentro de un área experimental ubicadas en las instalaciones de la UNAJ (Universidad Nacional de Juliaca), a condiciones normales de clima, donde se evitaron cambios bruscos temperatura y cambio de luz.

3.6.3 Seguimiento al crecimiento.

Todas las plantas se regaron dos veces al día con agua de grifo a tres cuartos de la capacidad de las macetas y se realizó un monitoreo durante el crecimiento de las características

morfológicas como son longitud de la planta, número de hojas, número de hojas con clorosis y necrosis, para poder identificar posibles efectos tóxicos generados por los suelos contaminados con Hg sobre las plantas de *Stipa ichu* Ruiz & Pav y la *Festuca dolichopylla* J. Presl

La comparación de resultados se realizó con plantas de *Stipa ichu* Ruiz & Pav y *Festuca dolichopylla* J. Presl sembradas en un suelo control sin contaminación, en el cual se le determinó la concentración de Hg T, pH y % de materia orgánica.

3.6.4 Análisis de laboratorio.

Durante los análisis en laboratorio de las muestras vegetales se realizaron procesos de digestión de estas con una mezcla de ácidos nítrico y sulfúrico durante tres horas a 100 -110 °C. Las lecturas de mercurio total se realizaron empleando espectroscopia de masa con plasma acoplado inductivamente utilizando el método EPA 6020 método recomendado por el MINAM. (Ministerio del Ambiente., 2017)

3.6.5 Cuantificación del mercurio en las plantas,

Al final de las pruebas experimentales se extrajo muestras homogéneas de suelo de las macetas (suelo en contacto directo con las raíces de las plantas colectadas), para llevarlos a analizar para la determinación de la concentración final del mercurio total (Hg T), en cada una de ellas mediante el método EPA 6020.

Se tuvo en cuenta que después de coleccionar las plantas se agitaron las raíces delicadamente para eliminar residuos de suelo adherido que constituyen también parte de la muestra de suelo.

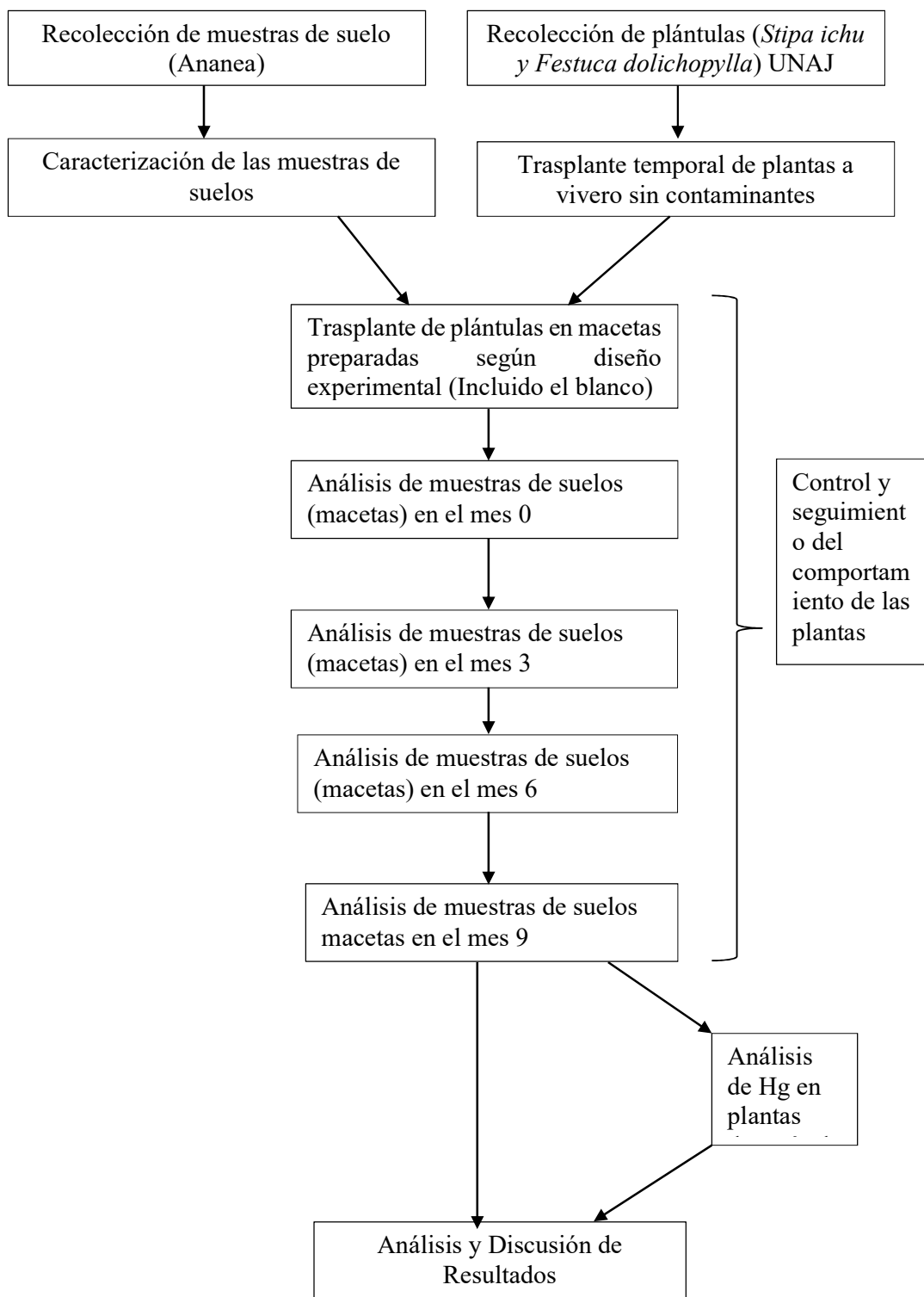


Figura 12: Diagrama de Flujo del proceso Experimental seguido.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Presentación de resultados.

4.1.1 Propiedades físico químicas del suelo.

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio, se determinaron en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional del Altiplano, los resultados se resumen en el cuadro 3 siguiente.

Cuadro 3: Propiedades fisicoquímicas de las muestras de suelos.

Parámetros del suelo	Pampa Blanca.	La Rinconada	Ananea	Compósito
pH	6.88	6.91	7.02	6.92
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	304	310	319	311
OM (g/Kg)	49.4	43.6	52.3	48.8
Densidad de suelo (g/cm^3)	1.17	1.21	1.19	1.19
Distribución de tamaño de partícula (%)	Arena 15.36 Limo 55.96 Arcilla 28.67	Arena 13.86 Limo 52.48 Arcilla 33.66	Arena 12.32 Limo 51.00 Arcilla 36.68	Arena 15.36 Limo 55.96 Arcilla 28.67
Mercurio total (mg/Kg)	51.13	53.14	44.00	49.4
Elemento Hg (mg/Kg)	27	35	21	28

Fuente: Análisis en laboratorio.

Los suelos al que se le tomaron las muestras tienen un pH neutro (de entre 6,88 y 7,04), y haciendo un análisis del contenido de mercurio, la forma elemental de este metal constituye aproximadamente el 56% de la cantidad total de mercurio en el suelo (ver cuadro 3). Las concentraciones de mercurio total (THg) en el suelo oscilaron entre 44 y 53 mg/kg, que es casi 2 veces mayor que el límite superior máximo para el contenido de mercurio (24 mg/kg) en suelos extractivos en Perú (Ministerio del Ambiente, 2015) y, por tanto, todos estos suelos muestreados puede considerarse contaminados con mercurio. Las concentraciones de mercurio total (THg) que se determinaron en el suelo de base o suelo control varían de 0,12 a 0,14 mg/kg.

4.1.2 Resultados de acumulación de mercurio en las plantas.

Los resultados de acumulación de mercurio en las plantas en estudio, se muestran en cuatro partes. Como sigue:

1.- *Festuca dolichopylla* J.Presl con tiosulfato de amonio.

- La concentración de THg en las raíces, tallos y hojas de la *Festuca dolichopylla* J. Presl después del tratamiento con tiosulfato se muestra en la la figura 13. Donde se puede observar que la concentración de THg se incrementó en 600%, 700% y 300% en raíces, tallos y hojas respectivamente para las macetas tratadas con 2 g/kg de tiosulfato, comparado con el suelo no tratado. Ver Cuadro 4:

Cuadro 4: Peso seco y masa total de Hg en hojas, tallo y raíz de la *Festuca dolichopylla* con tiosulfato de amonio.

Parte de la planta	Unidad de medida	Suelo Control	Suelo contaminado Sin tratamiento	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio 1g/kg	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio 2g/kg
Hoja	Peso seco (g)	$\mu = 3.58$ $\delta = 0.78$	$\mu = 3.36$ $\delta = 0.82$	$\mu = 4.68$ $\delta = 0.67$	$\mu = 4.76$ $\delta = 0.60$
	Masa THg (μg)	$\mu = 1.13$ $\delta = 0.55$	$\mu = 8.43$ $\delta = 1.55$	$\mu = 19.67$ $\delta = 1.62$	$\mu = 25.90$ $\delta = 1.34$
tallo	Peso seco (g)	$\mu = 4.29$ $\delta = 0.77$	$\mu = 5.09$ $\delta = 0.87$	$\mu = 3.70$ $\delta = 0.72$	$\mu = 5.70$ $\delta = 0.99$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.58$ $\delta = 0.06$	$\mu = 0.70$ $\delta = 0.12$	$\mu = 3.06$ $\delta = 0.76$	$\mu = 5.06$ $\delta = 0.36$
Raíz	Peso seco (g)	$\mu = 0.98$ $\delta = 0.13$	$\mu = 1.57$ $\delta = 0.08$	$\mu = 0.51$ $\delta = 0.22$	$\mu = 0.81$ $\delta = 0.32$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.40$ $\delta = 0.08$	$\mu = 1.40$ $\delta = 0.09$	$\mu = 4.54$ $\delta = 2.61$	$\mu = 8.54$ $\delta = 1.21$

Graficando en barras los datos del cuadro 4 se tiene la figura número 13 donde se puede observar que hay una mayor acumulación en las hojas, seguido por la raíz y el tallo, la mayor acumulación se da a mayor concentración de tiosulfato.

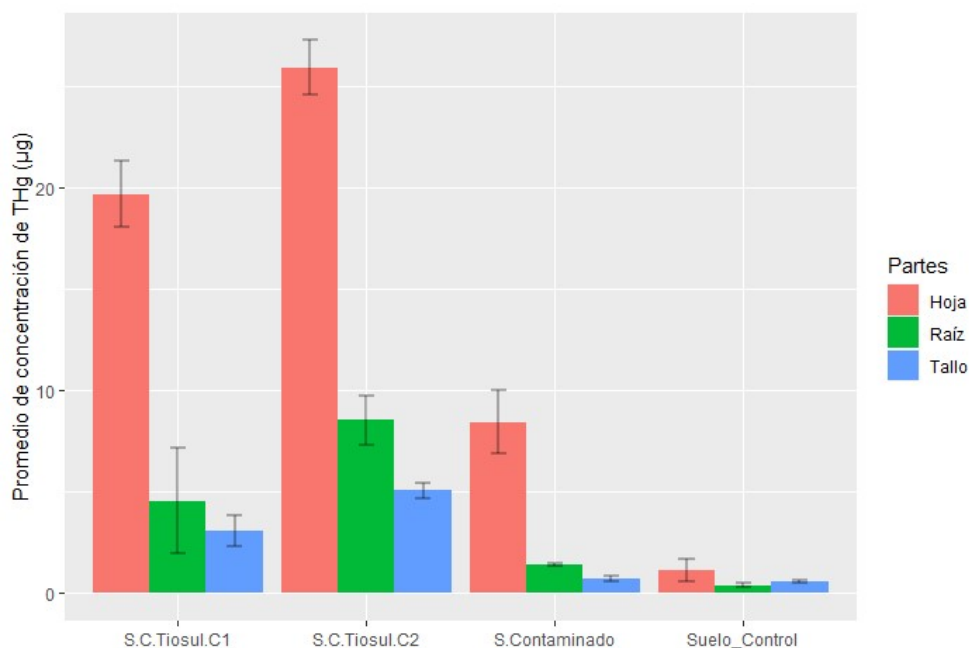


Figura 13: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con tiosulfato de amonio, para la *Festuca dolichopylla*.

2.- *Festuca dolichopylla* J. Presl con ioduro de potasio.

- La concentración de THg en las raíces, tallos y hojas de la *Festuca dolichopylla* J. Presl después del tratamiento con ioduro de potasio se muestran en la figura 14. Ahí se puede observar que la concentración de THg se incrementó 500%, 600% y 50% en raíces, tallos y hojas. Para las macetas tratadas con 2g/kg de ioduro de potasio, comparado con el suelo no tratado. Ver Cuadro 4:

Cuadro 5: Peso seco y masa total de mercurio de la hoja, tallo y raíz de una sola planta de *Festuca dolichopylla* con ioduro de potasio).

Parte de la planta	Unidad de medida	Suelo Control	Suelo contaminado Sin tratamiento	Suelo contaminado con ioduro de potasio C ₁	Suelo contaminado con ioduro de potasio C ₂
Hoja	Peso seco (g)	$\mu = 3.58$ $\delta = 0.78$	$\mu = 3.36$ $\delta = 0.82$	$\mu = 4.64$ $\delta = 0.60$	$\mu = 4.72$ $\delta = 0.50$
	Masa THg (μg)	$\mu = 1.13$ $\delta = 0.55$	$\mu = 8.43$ $\delta = 1.55$	$\mu = 10.23$ $\delta = 0.61$	$\mu = 12.45$ $\delta = 0.39$
tallo	Peso seco (g)	$\mu = 4.29$ $\delta = 0.77$	$\mu = 5.09$ $\delta = 0.87$	$\mu = 4.73$ $\delta = 0.72$	$\mu = 5.71$ $\delta = 0.99$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.58$ $\delta = 0.06$	$\mu = 0.70$ $\delta = 0.12$	$\mu = 1.58$ $\delta = 0.42$	$\mu = 2.16$ $\delta = 0.37$
Raíz	Peso seco (g)	$\mu = 0.98$ $\delta = 0.13$	$\mu = 1.57$ $\delta = 0.08$	$\mu = 0.91$ $\delta = 0.22$	$\mu = 0.81$ $\delta = 0.32$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.40$ $\delta = 0.08$	$\mu = 1.40$ $\delta = 0.09$	$\mu = 2.83$ $\delta = 1.01$	$\mu = 4.69$ $\delta = 0.91$

Haciendo el gráfico de barras respectivo de los datos del cuadro 5 se tiene la figura 14 donde se puede observar que hay una mayor acumulación en las hojas, seguido por la raíz y luego el tallo y la mayor acumulación se da a mayor concentración de ioduro de potasio en el suelo.

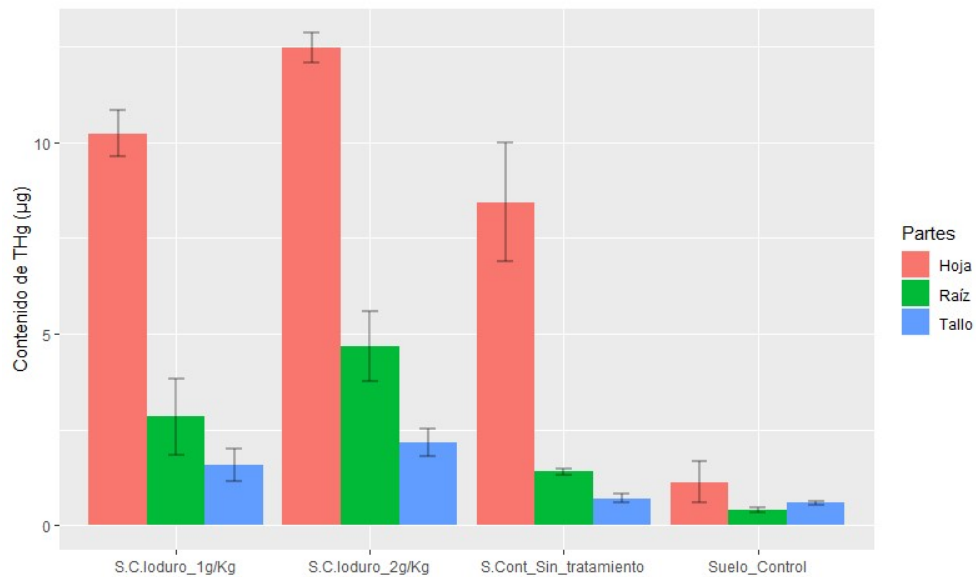


Figura 14: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con ioduro de potasio para la *Festuca dolichopylla*.

3.- *Stipa ichu* Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio.

La concentración de THg en las raíces, tallos y hojas de *Stipa ichu* después del tratamiento con tiosulfato de amonio se muestra en la figura 15. Esta concentración de THg se incrementó en 270%, 400% y 250 % en raíces, tallos y hojas respectivamente. Con suelos tratados con 2 g/kg de tiosulfato, en relación con las macetas no tratadas con tiosulfato. Ver Cuadro 6

Cuadro 6: Peso seco y masa total de mercurio de la hoja, tallo y raíz de una sola planta *Stipa ichu* con tiosulfato de amonio

Parte de la planta	Unidad de medida	Suelo Control	Suelo contaminado Sin tratamiento	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio C ₁	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio C ₂
Hoja	Peso seco (g)	$\mu = 3.58$ $\delta = 0.78$	$\mu = 3.56$ $\delta = 0.62$	$\mu = 3.68$ $\delta = 0.67$	$\mu = 3.76$ $\delta = 0.60$
	Masa THg (μg)	$\mu = 1.13$ $\delta = 0.55$	$\mu = 4.43$ $\delta = 1.55$	$\mu = 9.97$ $\delta = 1.62$	$\mu = 15.70$ $\delta = 1.34$
tallo	Peso seco (g)	$\mu = 4.29$ $\delta = 0.77$	$\mu = 4.09$ $\delta = 0.77$	$\mu = 4.70$ $\delta = 0.72$	$\mu = 4.75$ $\delta = 0.79$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.58$ $\delta = 0.06$	$\mu = 0.60$ $\delta = 0.12$	$\mu = 2.04$ $\delta = 0.76$	$\mu = 3.06$ $\delta = 0.36$
Raiz	Peso seco (g)	$\mu = 0.98$ $\delta = 0.13$	$\mu = 1.57$ $\delta = 0.28$	$\mu = 1.51$ $\delta = 0.22$	$\mu = 1.81$ $\delta = 0.26$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.40$ $\delta = 0.08$	$\mu = 1.50$ $\delta = 0.09$	$\mu = 3.54$ $\delta = 2.61$	$\mu = 5.54$ $\delta = 1.21$

Graficando los resultados del cuadro 6 en la figura número 15 donde se observa que hay una mayor acumulación en las hojas, seguido por la raíz y el tallo, la mayor acumulación se da a mayor concentración de tiosulfato de amonio.

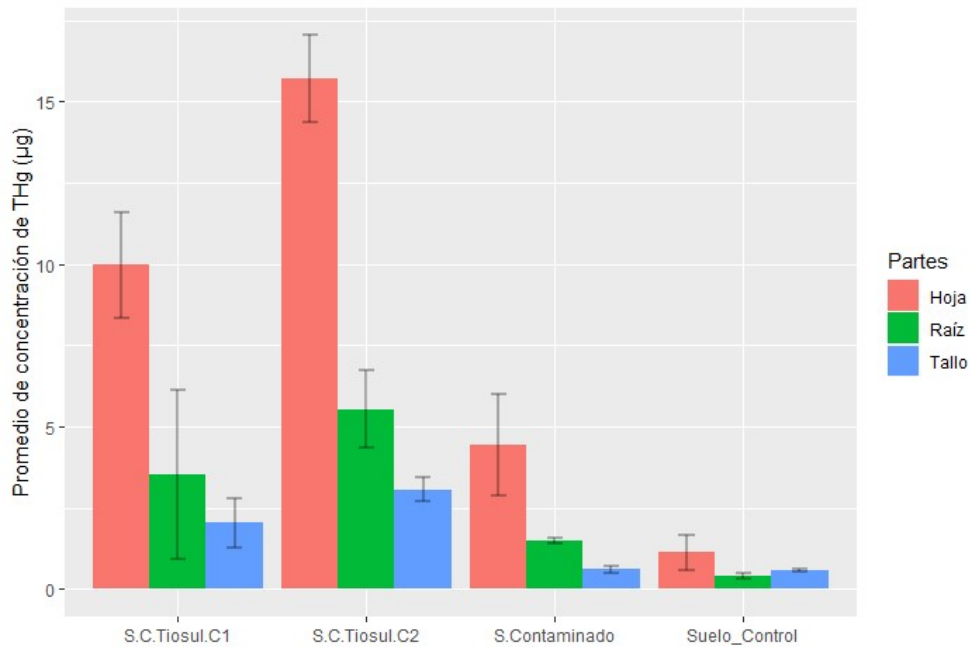


Figura 15: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con tiosulfato de amonio para el *Stipa ichu*

4.- *Stipa ichu* Ruiz & Pav con yoduro de potasio.

- La concentración de THg en las raíces, tallos y hojas de *Stipa ichu* después del tratamiento con yoduro de potasio se muestra en la figura 16. La concentración de THg se incrementó en 180%, 240% y 140% en raíces, tallos y hojas. para las macetas tratadas con 2g/kg de yoduro de potasio, respectivamente, en relación con el suelo no tratado. Ver Cuadro 7:

Cuadro 7: Peso seco y masa total de mercurio de la hoja, tallo y raíz de una sola planta de *Stipa ichu* con ioduro de potasio.

Parte de la planta	Unidad de medida	Suelo Control	Suelo contaminado Sin tratamiento	Suelo contaminado con ioduro de potasio C ₁	Suelo contaminado con ioduro de potasio C ₂
Hoja	Peso seco (g)	$\mu = 3.58$ $\delta = 0.78$	$\mu = 3.56$ $\delta = 0.62$	$\mu = 3.68$ $\delta = 0.67$	$\mu = 3.76$ $\delta = 0.60$
	Masa THg (μg)	$\mu = 1.13$ $\delta = 0.55$	$\mu = 4.43$ $\delta = 1.55$	$\mu = 7.97$ $\delta = 1.62$	$\mu = 10.70$ $\delta = 1.34$
tallo	Peso seco (g)	$\mu = 4.29$ $\delta = 0.77$	$\mu = 4.09$ $\delta = 0.77$	$\mu = 4.70$ $\delta = 0.72$	$\mu = 4.75$ $\delta = 0.79$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.58$ $\delta = 0.06$	$\mu = 0.60$ $\delta = 0.12$	$\mu = 1.01$ $\delta = 0.76$	$\mu = 2.06$ $\delta = 0.36$
Raíz	Peso seco (g)	$\mu = 0.98$ $\delta = 0.13$	$\mu = 1.57$ $\delta = 0.28$	$\mu = 1.51$ $\delta = 0.22$	$\mu = 1.81$ $\delta = 0.26$
	Masa THg (μg)	$\mu = 0.40$ $\delta = 0.08$	$\mu = 1.50$ $\delta = 0.09$	$\mu = 2.54$ $\delta = 2.61$	$\mu = 4.14$ $\delta = 1.21$

Graficando en forma de barras los datos que se muestran en el cuadro 7 se tiene la figura número 16 donde se puede observar que hay una mayor acumulación en las hojas, seguido por la raíz y el tallo, la mayor acumulación se da a mayor concentración de ioduro.

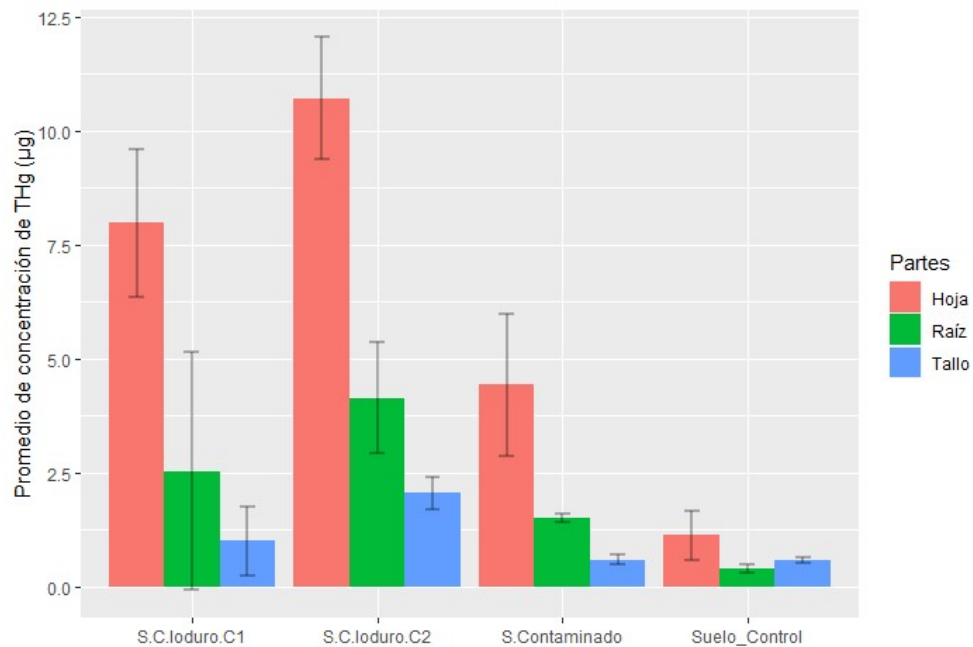


Figura 16: Concentración de THg en raíz, tallo y hoja en macetas control y en macetas tratadas con ioduro de potasio para el *Stipa ichu*.

4.1.3 Resultados de contaminante Hg en el suelo.

Para obtener los resultados de mercurio en el suelo, previamente se realizó un proceso de digestión de las muestras según el método EPA 7471 ó EPA 6020, con una mezcla de ácidos sulfúrico y nítrico en caliente durante tres horas a 100 -110 °C., esta operación se realizó en un digestor. El análisis de mercurio total se realizó empleando espectroscopia de masa con plasma inducido acoplado en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional del Altiplano. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Al final de todo el proceso experimental se tuvo que realizar la extracción de muestras en forma homogénea del suelo de las macetas, para ser llevados a análisis y posterior determinación de la concentración final de mercurio total, empleando el método descrito anteriormente.

En el proceso experimental se tuvieron cuatro diseños factorial para cada uno de ellos se tiene resultados los cuales se muestran en los siguientes cuadros:

- Primer diseño factorial *Festuca dolichopylla* J. Presl con tiosulfato de amonio. Cuadro N° 8
- Segundo diseño factorial *Festuca dolichopylla* J. Presl con ioduro de potasio. Cuadro N° 9
- Tercer diseño factorial *Stipa ichu* Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio. Cuadro N°10
- Cuarto diseño factorial *Stipa ichu* Ruiz & Pav con ioduro de potasio. Cuadro N° 11

Cuadro 8: Mercurio en el suelo tratado con la *Festuca dolichopylla* con tiosulfato de amonio (mg/kg)

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 2g/kg
0 meses	0.7	49.1	49.0	48.7
	0.8	49.4	49.3	49.0
	1.0	49.7	49.6	49.3
3 meses	0.9	37.9	25.9	11.9
	1.0	38.3	26.3	12.4
	0.8	38.7	26.7	13
6 meses	0.8	22.1	9.5	8.0
	0.9	23.4	10.4	8.3
	1.0	24.3	11.4	8.6
9 meses	0.7	14.3	8.1	4.4
	0.9	15.4	8.2	5.3
	0.8	16.5	8.3	6.2

Cuadro 9: Mercurio en el suelo tratado con la *Festuca dolychopilla* con ioduro de Potasio. (mg/kg)

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 2g/kg
0 meses	0.7	49.1	49.2	48.5
	0.8	49.4	49.5	49.0
	1.0	49.7	49.5	49.2
3 meses	0.9	37.9	30.9	21.9
	1.0	38.3	29.3	22.4
	0.8	38.7	29.7	23.2
6 meses	0.8	22.1	18.5	15.0
	0.9	23.4	18.4	15.3
	1.0	24.3	18.4	15.6
9 meses	0.7	14.3	11.7	08.4
	0.9	15.4	11.2	08.3
	0.8	16.5	11.3	08.2

Cuadro 10: Mercurio en el suelo tratado con el *Stipa ichu* con tiosulfato de amonio. (mg/kg)

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 2g/kg
0 meses	0.7	49.1	49.2	48.5
	0.8	49.4	49.5	49.0
	1.0	49.7	49.5	49.2
3 meses	0.9	41.9	39.9	31.9
	1.0	42.3	41.3	32.4
	0.8	41.7	40.7	33.2
6 meses	0.8	33.1	29.5	24.0
	0.9	33.4	30.3	23.3
	1.0	34.3	29.1	23.6
9 meses	0.7	24.3	18.7	13.4
	0.9	25.4	18.2	13.3
	0.8	26.5	18.3	13.2

Cuadro 11: Mercurio en el suelo tratado con *Stipa ichu* con ioduro de Potasio (mg/kg)

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 2g/kg
0 meses	0.7	49.1	49.2	48.5
	0.8	49.4	49.5	49.0
	1.0	49.7	49.5	49.2
3 meses	0.9	41.9	42.9	37.9
	1.0	42.3	43.3	36.4
	0.8	41.7	42.7	37.2
6 meses	0.8	33.1	34.5	26.0
	0.9	33.4	34.3	25.3
	1.0	34.3	33.1	26.6
9 meses	0.7	24.3	20.7	15.4
	0.9	25.4	21.2	16.3
	0.8	26.5	20.3	15.2

4.2 Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados.

4.2.1 Análisis y determinación de la dependencia de las variables en estudio.

Usando el paquete estadístico R se ha calculado los respectivos análisis ANOVA multivariado para los cuatro diseños experimentales a fin de establecer la diferencia de medias entre los factores: tiempo, concentración de químico y la combinación de ambos en la afectación del contenido de mercurio en el suelo antes, durante y después del tratamiento con las plantas.

Usando también el paquete estadístico R se ha calculado los coeficientes de correlación multivariados a un nivel de significancia de 95% y se ha calculado el valor estadístico F crítico con probabilidad del 95% para cada uno de los cuatro diseños

Los cuatro diseños experimentales son:

- Primer diseño factorial *Festuca dolichopylla* J. Presl con tiosulfato de amonio. Cuadro N° 8
- Segundo diseño factorial *Festuca dolichopylla* J. Presl con ioduro de potasio. Cuadro N° 9
- Tercer diseño factorial *Stipa ichu* Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio. Cuadro N°10
- Cuarto diseño factorial *Stipa ichu* Ruiz & Pav con ioduro de potasio. Cuadro N° 11

1.- *Festuca dolichopylla* J. Presl con tiosulfato de amonio.

Utilizando los datos del cuadro N° 8, se hace el respectivo análisis ANOVA multivariable que se muestra en cuadro 12

Cuadro 12: Análisis ANOVA factorial para la *Festuca dolichopylla* con tiosulfato de amonio.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado de media	F	Valor-p
A: Tiem	8499	3	2833	6613.9	<2e-16
B: Tiosul..	1009	2	504.5	1177.9	<2e-17
AB	552	6	92	214.8	<2e-18
Residual	10	24	0.4		

Del cuadro anterior se observa que el valor de probabilidad resultante de F calculado es muy inferior a la probabilidad de 0.05 que corresponde a F critico por lo que se concluye que los dos factores y la combinación de ambos tienen medias muy diferentes entre sí y que hay dependencia.

2.- *Festuca dolichopylla* J. Presl con ioduro de potasio.

Utilizando los datos del cuadro N° 9, se hace el respectivo análisis ANOVA multivariable que se muestra en cuadro 13

Cuadro 13: Análisis ANOVA factorial para la *Festuca dolichopylla* con ioduro de potasio

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado de media	F	Valor-p
A: Tiem	7216.3	3	2405.44	6972.278	<2e-16
B: Ioduro	370.1	2	185.03	536.305	<2e-16
AB	178	6	29.66	85.967	4.99E-15
Residual	8.3	24	0.34		

Del cuadro anterior se observa que el valor de probabilidad resultante de F calculado es muy inferior a la probabilidad de 0.05 que corresponde a F critico por lo que se concluye que los dos factores y la combinación de ambos tienen medias muy diferentes entre sí y que hay dependencia

3.- *Stipa ichu* Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio.

Utilizando los datos del cuadro N° 10, se hace el respectivo análisis ANOVA multivariable que se muestra en cuadro 14.

Cuadro 14: Análisis ANOVA factorial para el *Stipa ichu* con tiosulfato de amonio.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado de media	F	Valor-p
A: Tiem	4504.7	3	1501.58	5233.008	<2,2e-16
B: Tiosulfato	391.7	2	195.85	682.549	<2,2e-16
AB	138.8	6	23.14	80.636	1.03E-14
Residual	6.9	24	0.29		

Del cuadro anterior se observa que el valor de probabilidad resultante de F calculado es muy inferior a la probabilidad de 0.05 que corresponde a F crítico por lo que se concluye que los dos factores y la combinación de ambos tienen medias muy diferentes entre sí y que hay dependencia

4.- *Stipa ichu* Ruiz & Pav con ioduro de potasio.

Utilizando los datos del cuadro N° 11, se hace el respectivo análisis ANOVA multivariable que se muestra en cuadro 15

Cuadro 15: Análisis ANOVA factorial para el *Stipa ichu* con ioduro de potasio.

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado de media	F	Valor-p
A: Tiempo	4109.9	3	1369.93	3967.63	<2e-16
B: Ioduro	226.6	2	112.82	326.744	<2e-16
AB	98.1	6	16.35	47.364	3.90E-12
Residual	8.3	24	0.35		

Del cuadro anterior se observa que el valor de probabilidad resultante de F calculado es muy inferior a la probabilidad de 0.05 que corresponde a F crítico por lo que se concluye que los dos factores y la combinación de ambos tienen medias muy diferentes entre sí y que hay dependencia

4.2.2 **Correlaciones Concentración Hg en el suelo Vs biomasa (peso seco)**

Aunque no es el propósito relacionar estas variables en la presente investigación, se hace esta correlación a fin de determinar que las variables independientes concentración de mercurio y contenido de mercurio en la biomasa (peso seco) están correlacionadas entre sí.

1.- ***Festuca dolichopylla J. Presl con tiosulfato de amonio.***

El siguiente cuadro se elaboró en base a los cuadros N° 4 y N° 8 a fin de determinar el respectivo análisis de correlación.

Cuadro 16: Correlación entre el Hg en la biomasa de la *Festuca dolichopylla* con la concentración de Hg en los suelos usando tiosulfato de amonio.

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 2g/kg
Peso seco (g)	8.85	10.02	8.89	11.27
Masa THg (µg)	2.11	10.53	27.27	39.5
Concentración inicial Hg en el suelo (mg)	0.8	49.4	49.3	49.0
Concentración final Hg en el suelo (mg)	0.8	15.4	8.2	5.3

Usando el paquete estadístico SPSS Versión 25 de IBM se ha determinado el estadístico de Pearson que se muestra en la siguiente tabla a fin establecer si existe correlación entre las dos variables mencionadas.

Cuadro 17: Correlación Pearson Cuadro 16

		Masa de Hg en la biomasa ug/g	Concentración de mercurio en el suelo mg/kg
Masa de Hg en la biomasa ug/g	Correlación de Pearson	1	-,989*
	Sig. (unilateral)		0.048
	N	3	3
Concentración de mercurio en el suelo mg/kg	Correlación de Pearson	-,989*	1
	Sig. (unilateral)	0.048	
	N	3	3

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (unilateral).

Del cuadro N° 17 se observa que la significancia calculada es 0.048 que es menor a 0.05 lo que nos indica que si hay correlación entre estas variables y el valor de Pearson es de -0.989 lo que nos indica que hay una fuerte correlación inversa.

2.- *Festuca dolichopylla* J. Presl con ioduro de potasio.

El siguiente cuadro se elaboró en base a los cuadros N° 5 y N° 9 a fin de determinar el respectivo análisis de correlación.

Cuadro 18: Correlación entre el Hg en la biomasa de la *Festuca dolichopylla* con la concentración de Hg en los suelos usando ioduro de potasio.

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 2g/kg
Peso seco (g)	8.85	10.02	10.28	11.24
Masa THg (µg)	2.11	10.53	14.64	19.3
Concentración inicial Hg en el suelo (mg)	0.8	49.4	49.4	48.9
Concentración final Hg en el suelo (mg)	0.8	15.4	11.4	8.3

Usando el paquete estadístico SPSS Versión 25 de IBM se ha determinado el estadístico de Pearson que se muestra en la siguiente tabla a fin establecer si existe correlación entre las dos variables mencionadas.

Cuadro 19: Correlación Pearson Cuadro N° 18

		Masa de Hg en la biomasa ug/g	Concentración de mercurio en el suelo mg/kg
Masa de Hg en la biomasa ug/g	Correlación de Pearson	1	-,994*
	Sig. (unilateral)		0.035
	N	3	3
Concentración de mercurio en el suelo mg/kg	Correlación de Pearson	-,994*	1
	Sig. (unilateral)	0.035	
	N	3	3

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (unilateral).

Del cuadro N° 19 se observa que la significancia calculada es 0.035 que es menor a 0.05 lo que nos indica que si hay correlación entre estas variables y el valor de Pearson es de -0.994 lo que nos indica que hay una fuerte correlación inversa.

3.- *Stipa ichu Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio.*

El siguiente cuadro se elaboró en base a los cuadros N° 6 y N° 10 a fin de determinar el respectivo análisis de correlación.

Cuadro 20: Correlación entre el Hg en la biomasa de la *Stipa ichu* con la concentración de Hg en los suelos usando tiosulfato de amonio.

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con tiosulfato de amonio 2g/kg
Peso seco (g)	8.85	9.22	9.89	10.32
Masa THg (µg)	2.11	6.53	15.55	24.3
Concentración inicial Hg en el suelo (mg)	0.8	49.4	49.4	48.9
Concentración final Hg en el suelo (mg)	0.8	25.4	18.4	13.3

Usando el paquete estadístico SPSS Versión 25 de IBM se ha determinado el estadístico de Pearson que se muestra en la siguiente tabla a fin establecer si existe correlación entre las dos variables mencionadas.

Cuadro 21: Correlación Pearson Cuadro N° 20

		Masa de Hg en la biomasa ug/g	Concentración de mercurio en el suelo mg/kg
Masa de Hg en la biomasa ug/g	Correlación de Pearson	1	-,997*
	Sig. (unilateral)		0.026
	N	3	3
Concentración de mercurio en el suelo mg/kg	Correlación de Pearson	-,997*	1
	Sig. (unilateral)	0.026	
	N	3	3

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (unilateral).

Del cuadro N° 21 se observa que la significancia calculada es 0.026 que es menor a 0.05 lo que nos indica que si hay correlación entre estas variables y el valor de Pearson es de -0.997 lo que nos indica que hay una fuerte correlación inversa.

4.- *Stipa ichu* Ruiz & Pav con ioduro de potasio.

El siguiente cuadro se elaboró en base a los cuadros N° 7 y N° 11 a fin de determinar el respectivo análisis de correlación.

Cuadro 22: Correlación entre el Hg en la biomasa del *Stipa ichu* con la concentración de Hg en los suelos usando ioduro de potasio.

Tiempo	Suelo Control	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 1g/kg	Suelo contaminado tratado con ioduro de potasio 2g/kg
Peso seco (g)	8.85	9.22	9.89	10.32
Masa THg (µg)	2.11	6.53	11.52	16.9
Concentracion inicial Hg en el suelo (mg)	0.8	49.4	49.4	48.9
Concentracion final Hg en el suelo (mg)	0.8	25.4	20.73	15.63

Usando el paquete estadístico SPSS Versión 25 de IBM se ha determinado el estadístico de Pearson que se muestra en la siguiente tabla a fin establecer si existe correlación entre las dos variables mencionadas.

Cuadro 23: Correlación de Pearson del cuadro 22

		Masa de Hg en la biomasa ug/g	Concentración de mercurio en el suelo mg/kg
Masa de Hg en la biomasa ug/g	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (unilateral)		0.001
	N	3	3
Concentración de mercurio en el suelo mg/kg	Correlación de Pearson	-1,000**	1
	Sig. (unilateral)	0.001	
	N	3	3

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (unilateral).

Del cuadro N° 19 se observa que la significancia calculada es 0.001 que es muy menor a 0.05 lo que nos indica que si hay correlación entre estas variables y el valor de Pearson es de -1 lo que nos indica que hay una muy fuerte correlación inversa.

4.2.3 Factor de Bioacumulación e Interpretación de Resultados

1.- *Festuca dolichopylla* J. Presl con tiosulfato de amonio.

- El factor de bioacumulación (BAF) del mercurio por *Festuca dolichopylla* J. Presl con el uso de tiosulfato de amonio, se define usando la siguiente ecuación.

$$\text{Factor bioacumulación (BAFTotal)} = \frac{\text{Concentración THg brote de la planta}}{\text{Concentración de THg en el suelo}}$$

El BAF que se muestra en el cuadro N° 24, se calculó en base a los datos de los cuadros 4 y 8 donde se observa que la concentración total del mercurio es mayor en la hoja, raíz y tallo respectivamente para plantas tratadas con tiosulfato en relación con las no tratadas. Esto respalda la observación de que el tiosulfato aumenta la absorción de mercurio por *Festuca dolichopylla* J. Presl.

Cuadro 24: BAF de la *Festuca dolichopylla* con tiosulfato de amonio.

	Suelo contaminado son tratamiento	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio 1g/kg suelo	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio 2g/kg suelo
Total THg absorbido por Kg planta (µg)	3538.17	13931.98	16872.11
Mercurio extraído por Kg de suelo (µg)	34000	41100	43700
BAF total	0.104	0.339	0.386

El BAF se obtiene utilizando la concentración extraída de mercurio en el suelo al final del experimento, se observa que el BAF es mayor para el suelo tratado con tiosulfato con mayor concentración (2 g/kg), sin embargo dado que es un valor menor a la unidad se determina que la *Festuca dolichopylla* no es hiperacumuladora de mercurio pero dado su potencial fitoextractor puede ser usado en forma práctica.

2.- *Festuca dolichopylla* J. Presl con ioduro de potasio.

- El factor de bioacumulación (BAF) del mercurio por *Festuca dolichopylla* J. Presl con el uso de ioduro de potasio, se da mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Factor bioacumulación (BAFTotal)} = \frac{\text{Concentración THg brote de la planta}}{\text{Concentración de THg en el suelo}}$$

El BAF que se muestra en el cuadro N° 25, se calculó en base a los datos de los cuadros 5 y 9 donde se observa que la concentración total del mercurio es mayor en la hoja, raíz y tallo respectivamente para plantas tratadas con ioduro en relación con las no tratadas. Esto respalda la observación de que también el ioduro puede aumentar la absorción de mercurio por *Festuca dolichopylla*.

Cuadro 25: BAF de la *Festuca dolichopylla* con ioduro de potasio.

	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado con ioduro de potasio 1g/kg suelo	Suelo contaminado con ioduro de potasio 2g/kg suelo
Total THg absorbido por planta (µg)	3538.17	5648.67	8806.12
Mercurio extraído por Kg de suelo (µg)	34000	38000	40600
BAF total	0.104	0.149	0.217

El BAF se obtiene utilizando la concentración extraída de mercurio en el suelo al final del experimento, se observa que el BAF es mayor para el suelo tratado con ioduro con mayor concentración (2 g/kg), sin embargo dado que es un valor menor a la unidad se determina que la *Festuca dolichopylla* no es hiperacumuladora de mercurio en este caso usando el ioduro de potasio.

3.- *Stipa ichu* Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio.

- El factor de bioacumulación (BAF) del mercurio por *Stipa ichu* Ruiz & Pav con el uso de tiosulfato de amonio, se define en este trabajo usando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Factor bioacumulación (BAFTotal)} = \frac{\text{Concentración THg brote de la planta}}{\text{Concentración de THg en el suelo}}$$

El BAF que se muestra en el cuadro N° 26, se calculó en base a los datos de los cuadros 6 y 10 donde se observa que la concentración total del mercurio es mayor en la hoja, raíz y tallo respectivamente para plantas tratadas con tiosulfato de amonio en relación con las no tratadas. Esto respalda la observación de que el tiosulfato de amonio puede aumentar la absorción de mercurio por *Stipa ichu* Ruiz & Pav.

Cuadro 26: BAF del *Stipa ichu* Ruiz & Pav con tiosulfato de amonio.

	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio 1g/kg suelo	Suelo contaminado con tiosulfato de amonio 2g/kg suelo
Total THg absorbido por planta (µg)	2346.50	5487.65	7880.52
Mercurio extraído por Kg de suelo (µg)	24000	31000	35600
BAF total	0.10	0.18	0.22

El BAF se obtiene utilizando la concentración extraída de mercurio en el suelo al final del experimento, se observa que el BAF es mayor para el suelo tratado con tiosulfato con mayor concentración (2 g/kg), sin embargo dado que es un valor menor a la unidad se determina que el *Stipa ichu* Ruiz & Pav no es hiperacumuladora de mercurio pero dado su potencial fitoextractor puede ser usado en forma práctica.

4.- *Stipa Ichu* con ioduro de potasio.

- El factor de bioacumulación (BAF) del mercurio por *Stipa ichu* con el uso de ioduro de potasio, se define en este trabajo usando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Factor bioacumulación (BAFTotal)} = \frac{\text{Concentración THg brote de la planta}}{\text{Concentración de THg en el suelo}}$$

El BAF que se muestra en el cuadro N° 27, se calculó en base a los datos de los cuadros 7 y 11 donde se observa que la concentración total del mercurio es mayor en la hoja, raíz y tallo respectivamente para plantas tratadas con ioduro en relación con las no tratadas. Esto respalda la observación de que el ioduro puede aumentar la absorción de mercurio por *Stipa ichu* Ruiz & Pav.

Cuadro 27: BAF de la *Stipa ichu* con ioduro de potasio.

	Suelo contaminado sin tratamiento	Suelo contaminado con ioduro de potasio 1g/Kg suelo	Suelo contaminado con ioduro de potasio 2g/Kg suelo
Total THg absorbido por planta (µg)	2346.5	4062.8	5566.7
Mercurio extraído por Kg de suelo (µg)	24000	28666.7	33266.7
BAF total	0.10	0.14	0.17

El BAF se obtiene utilizando la concentración extraída de mercurio en el suelo al final del experimento, se observa que el BAF es mayor para el

suelo tratado con ioduro con mayor concentración (2 g/kg), sin embargo dado que es un valor menor a la unidad se determina que la *Stipa ichu* Ruiz & Pav no es hiperacumuladora de mercurio.

4.2.4 Discusión de Resultados.

En el presente trabajo de investigación los suelos contaminados traídos del distrito de Ananea fueron tratados con tiosulfato de amonio y ioduro de potasio a diferentes concentraciones empleando la *Festuca dolichophylla* J. Presl y el *Stipa ichu* Ruiz & Pav efectuandose la fitorremediación durante 9 meses en laboratorio, estas plantas absorbieron buena cantidad de Hg disminuyendo el contenido de Hg en los suelos contaminados como se pueden observar en los cuadros 24,25, 26 y 27.

El objetivo general de la investigación es determinar la eficacia de fitorremediación del *Stipa ichu* y la *Festuca dolichophylla* usando al tiosulfato de amonio y ioduro de potasio de suelos contaminados con Mercurio por actividades mineras del distrito de Ananea, para cumplir con este objetivo se ha desarrollado el cuadro N° 28 donde se determina la eficacia de la extracción de las plantas en mención utilizando los resultados de la presente investigación

Cuadro 28: Eficacia de la fitorremediación con *Festuca dolichophylla* y *Stipa ichu* en los suelos contaminados con Hg.

	<i>Festuca dolichophylla</i> con tiosulfato de amonio	<i>Festuca dolichophylla</i> con ioduro de potasio	<i>Stipa ichu</i> con tiosulfato de amonio	<i>Stipa ichu</i> con ioduro de potasio
Remoción de Hg del suelo por planta (mg/kg)	43.7	40.6	35.6	33.3
Rendimiento por (g/Ha)	492.5	457.6	401.2	374.9
Hg inicial en el suelo (mg/kg)	49	48.9	48.9	48.9
% de eficacia	0.89	0.83	0.73	0.68

En el anterior cuadro se demuestra, que la fitorremediación con *Festuca dolichopylla* J. Presl y con el *Stipa ichu* Ruiz & Pav es una tecnología viable para disminuir la concentración de mercurio total (THg) del suelo de Ananea a un nivel seguro. Sin embargo debe considerarse que entre las dos plantas, la *Festuca dolichopylla* J. Presl es la más adecuada por su mayor eficacia

Para comparar los resultados de la presente investigación con otras investigaciones se tiene el cuadro 29.

Cuadro 29: Cuadro comparativo con otras especies fitorremediadoras.

Especie de planta	Acelerador químico	Efecto promotor
<i>Willow</i>	KI	6.46-8.26 mg/g en plantas
<i>Poa annua</i>	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	2.66 mg/kg en raíces
<i>Brassica juncea</i>	NH ₄ SCN	0.1 mg/Kg (raíces), 0.1 mg/kg (hojas)
<i>Solanum nigrum</i> L.	Biocarbón	0.01, 0.05, 0.09 y 0.1 mg/kg (Hg acumulación en raíces después de 4, 5, 6 y 7 meses)
<i>Oryza sativa</i> L.	Sulfuro fertilizante	4-15 mg/kg (IHg acumulación en granos), 0.3-1 mg/kg (IHg acumulación en pajas), 10-28µg/kg (Hg acumulación en raíces)
<i>Helianthus annuus</i>	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	4.66 mg/kg (Hg acumulación en hojas, 96.39 mg/kg (Hg acumulación en raíces)
<i>Brassica juncea</i>	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	71.5 mg/kg (Hg acumulación en raíces), 41.5 mg/kg (Hg acumulación en brotes)
<i>Festuca dolichopylla</i> *	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	16.87 mg/kg total en plantas.
<i>Festuca dolichopylla</i> *	KI	8.81 mg/kg total en plantas.
<i>Stipa ichu</i> *	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	7.88 mg/kg total en plantas
<i>Stipa ichu</i> *	KI	5.57 mg/kg total en plantas

Fuente: (Lui, et al., 2020)(*) Resultado del presente trabajo de investigación.

En el cuadro N° 29, se observa que la *Festuca dolichopylla* J. Presl absorbe hasta 16.87 mg/kg usando tiosulfato de amonio el cual es superior al de otras plantas a excepción de la *Brassica juncea*,. Sin embargo usando ioduro de potasio su absorción es apenas superior al *Willow*. Absorbiendo 8,81 mg/kg total en hojas.

Si analizamos los resultados del *Stipa ichu* Ruiz & Pav tanto con la adición de tiosulfato de amonio o ioduro de potasio la absorción de mercurio por planta es de 7.88 mg/kg y 5.57 mg/kg respectivamente, similar a otras especies vegetales que se muestran en el cuadro 29,

Si se trata de seleccionar; la combinación más eficaz entre especie vegetal y acelerador químico para una fitorremediación en Ananea, sería la de la *Festuca dolichopylla* Ruiz & Pav con el tiosulfato de amonio dado su potencial fitoextractor. (Cuadro 28). Teniendo en cuenta estos resultados, podría potencialmente usarse para manejar el nivel de contaminación de mercurio del suelo del distrito de Ananea, reduciendo así la cantidad de mercurio en los depósitos de este metal de los suelo por lo tanto, podría ser utilizado para reducir el riesgo medioambiental en un plazo aceptable. Sin embargo, como cualquier operación en la que se apliquen productos químicos al suelo para promover la solubilidad de los metales debe realizarse y manejarse con cuidado.

En la investigación desarrollada no se pudo tener acceso a otras áreas diferentes para el muestreo debido a que son zonas restringidas pertenecientes a empresas mineras y a comunidades de Ananea, por lo que si se quiere replicar estas pruebas experimentales es necesario tomarlo en cuenta, además el tiempo de tratamiento también se vio limitado a nueve meses por el uso de las instalaciones de la UNAJ, esto podría haberse extendido a un tiempo más prolongado y obtenerse tal vez mejores resultados, Finalmente en los resultados se observó que hay una pequeña pérdida de Hg no determinada en los cálculos del balance de materia para este elemento, podría sospecharse de una evaporación de mercurio o una acumulación en las raíces, esto podría determinarse en un posterior estudio.

4.3 Prueba de Hipótesis.

4.3.1 Hipótesis específicas 1.

Enunciado. Existe relación entre la capacidad fitorremediadora del *Festuca dolichopilla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio con la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio.

Hipótesis Nula:

No existe relación entre la capacidad fitorremediadora de la *Festuca dolichopilla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio con la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio.

Hipótesis Alterna:

Existe relación entre la capacidad fitorremediadora del *Festuca dolichopilla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio con la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio.

Para calcular la dependencia de la variable concentración de Hg en los suelos respecto a la concentración de tiosulfato de amonio (empleando la *Festuca dolichopilla* J. Presl como fitorremediador) y el tiempo es necesario hacer una regresión múltiple cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro. Los cálculos estadísticos se desarrollaron en el paquete estadístico R.

Cuadro 30: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de tiosulfato de amonio más el tiempo con la *Festuca dolichopilla*.

	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	50.6244	2.268	22.32	<2e-16 ***
Tiosulfato	-6.4167	1.3395	-4.79	3.42e-05***
Tiempo	-4.3493	0.3261	-13.34	<2e-16 ***
Residual standard error: 6.562 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.8589,				
F-statistic: 100.4 on 2 and 33 DF, p-value: 9.294e-15				

Del cuadro anterior, p del F critico resulta $< 3.42e-05$ que es muy $<$ a 0.05 dada a esta comparación, se determina que si hay dependencias de las variables en estudio (tiempo y concentración con tiosulfato respecto al contenido de Hg en el suelo). Por lo que se acepta la hipótesis alterna

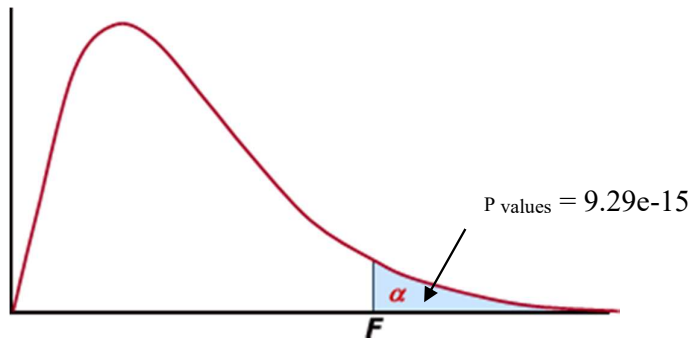


Figura 17: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°30

Para calcular la dependencia de la variable concentración de Hg en los suelos respecto a la concentración de ioduro de potasio (empleando la *Festuca dolichopylla* J. Presl como fitorremediador) y el tiempo es necesario hacer una regresión múltiple cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro. Los cálculos estadísticos se desarrollaron en el paquete estadístico R.

Cuadro 31: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de ioduro de potasio más el tiempo con la *Festuca dolichopylla*.

	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	50.0464	1.346	37.181	$<2e-16$ ***
Ioduro	-3.9208	0.795	-4.932	$2.25e-05$ ***
Tiempo	-41285	0.1935	-21.333	$<2e-16$ ***
Residual standard error: 3.895 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.9356, Adjusted R-squared: 0.9317				
F-statistic: 239.7 on 2 and 33 DF, p-value: $< 2.2e-16$				

Del cuadro anterior, p del F critico resulta $<2.25 \times 10^{-5}$ que es muy $<$ a 0.05 dada a esta comparación, se determina que si hay dependencias de las variables en estudio (tiempo y concentración con ioduro de potasio respecto al contenido de Hg en el suelo). Por lo que se acepta la hipótesis alterna

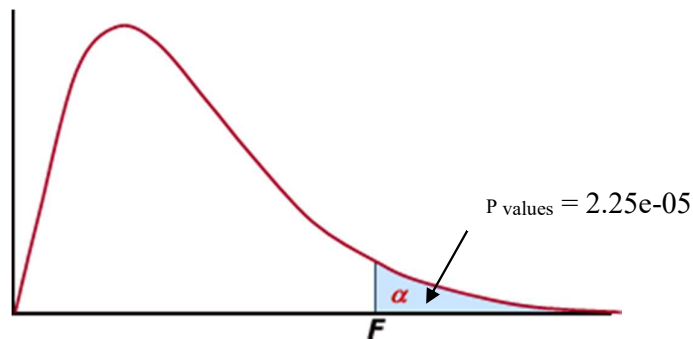


Figura 18: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°31

4.3.2 Hipótesis específicas 2.

Enunciado. Existe relación entre la capacidad fitorremediadora del *Stipa ichu* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio con la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio.

Hipotesis Nula:

No existe relación entre la capacidad fitorremediadora del *Stipa ichu* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio con la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio.

Hipotesis Alterna:

Existe relación entre la capacidad fitorremediadora del *Stipa ichu* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio con la fitorremediación del suelo contaminado con mercurio.

Para calcular la dependencia de la variable concentración de Hg en los suelos respecto a la concentración de tiosulfato de amonio (empleando el *Stipa ichu* Ruiz & Pav e cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro. Los cálculos estadísticos se desarrollaron en el paquete estadístico R.

Cuadro 32: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de tiosulfato de amonio más el tiempo con el *Stipa ichu*.

	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	52.9031	0.7523	70.32	<2e-16 ***
Tiosulfato	-4.0042	0.4443	-9.012	2.05e-10 ***
Tiempo	-3.3337	0.1082	-30820	<2e-16 ***
Residual standard error: 2.177 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.969,		Adjusted R-squared: 0.9671		
F-statistic: 515.5 on 2 and 33 DF, p-value: < 2.2e-16				

Del cuadro anterior, p del F crítico resulta 2.05×10^{-10} que es muy menor a 0.05 dada a esta comparación, se determina que si hay dependencias de las variables en estudio (tiempo y concentración con tiosulfato de amonio respecto al contenido de Hg en el suelo). Por lo que se acepta la hipótesis alterna.

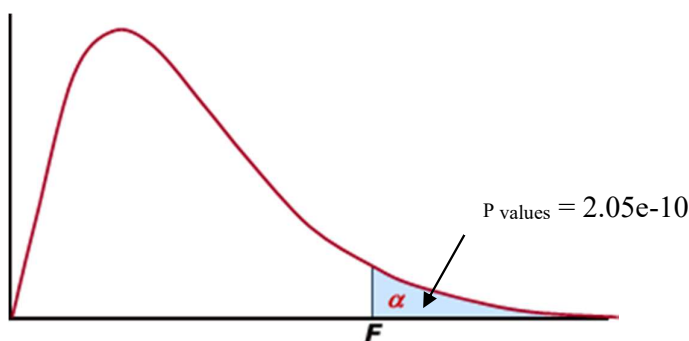


Figura 19: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°32

Para calcular la dependencia de la variable concentración de Hg en los suelos respecto a la concentración de ioduro de potasio (empleando el *Stipa ichu* Ruiz & Pav como fitorremediador) y el tiempo es necesario hacer una regresión múltiple cuyos resultados se muestran en el cuadro 33. Los cálculos estadísticos se desarrollaron en el paquete estadístico R.

Cuadro 33: Regresión multivariada entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de ioduro de potasio más el tiempo con el *Stipa ichu*.

	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	52.5808	0.7327	71.763	<2e-16 ***
Ioduro	-2.8375	0.4328	-6.557	1.89e-07***
Tiempo	-3.1819	0.1053	-30.204	<2e-16 ***
Residual standard error: 2.12 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.9666, Adjusted R-squared: 0.9646				
F-statistic: 477.6 on 2 and 33 DF, p-value: < 2.2e-16				

Del cuadro anterior, p del F critico resulta 1.89e-07 que es muy menor a 0.05 dada a esta comparación, se determina que si hay dependencias de las variables en estudio (tiempo y concentración con ioduro de potasio respecto al contenido de Hg en el suelo). Por lo que se acepta la hipótesis alterna.

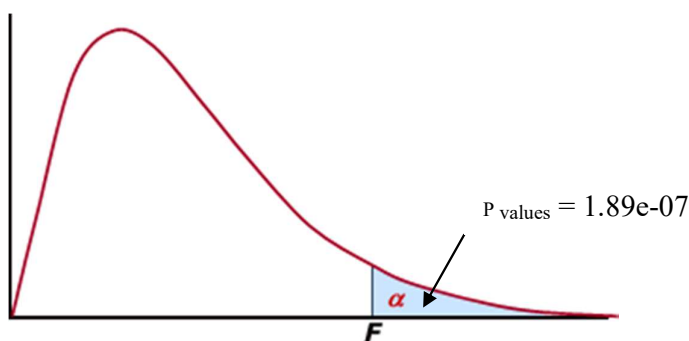


Figura 20: Curva de distribución de Fisher ($\alpha = 0.05$) para el cuadro N°33

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

- La eficacia de remoción de mercurio del suelo contaminado con mercurio del distrito de Ananea para la *Festuca dolichopylla* J. Presl con el tiosulfato de amonio y ioduro de potasio es de 89% y 83% respectivamente. Para el *Stipa ichu* Ruiz & Pav con el tiosulfato de amonio y ioduro de potasio es de 73 y 68% respectivamente.
- La capacidad fitorremediadora del *Stipa Ichu* Ruiz & Pav usando tiosulfato y ioduro de potasio es de 35.6 mg Hg por kg de planta y 33.3 mg de Hg por kg planta respectivamente.
- La capacidad fitorremediadora de la *Festuca dolichopylla* J. Presl usando tiosulfato y ioduro de potasio es de 43.7.6 mg Hg por kg de planta y 40.6 mg de Kg por kg planta respectivamente.
- Teniendo en cuenta los resultados, la fitorremediación de mercurio con la *Festuca dolichopylla* asistida por tiosulfato puede usarse para manejar el nivel de contaminación de mercurio del suelo del distrito de Ananea, el cual reduciría efectivamente la cantidad de mercurio en los suelos.

Recomendaciones.

- Cuando se requiera tomar muestras de los suelos de Ananea Puno Perú, se debe tomar en cuenta que es un área restringida y peligrosa, ya que en esta zona hay marcada ausencia del estado Peruano.
- Como en esta investigación se aplica productos químicos al suelo para promover la solubilidad de los metales debe realizarse y manejarse con cuidado.
- En un estudio posterior se recomienda incluir un análisis gaseoso de mercurio por el método de cromatografía de gases u otro método para detectar el mercurio que probablemente se volatiliza al momento de hacer la fitorremediación.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Activos Mineros. (2012). *Remediacion de Suelos Contaminados*. Obtenido de Activos Mineros S.A.C.:
<http://www.activosmineros.com.pe/amsac/index.php/proyectos-en-ejecucion>
- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*. New York: Springer.
- Anna, C. K., & Barandiaran, A. (2002). *La Oroya Cannot Wait*. Lima: Sociedad Peruana de Derecho Ambiental.
- Argota, G., Encinas, M., Argota, H., & Lannacone, J. (2014). Coeficientes biológicos de Fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando *Alopecurus Magellanicus Bracteatus* y *Muhlenbergia Angustata* (Poaceae), Puno, Perú. *The Biologist*, 12(1), 99-108.
- Arnau, J., & Bono, R. (2017). *Diseños Experimentales: Prácticas*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Baker, A. (1981). *Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals*. Barcelona: Limusa.
- Bautista, F. (2007). *Introduccion al Estudio de la Contaminacion del Suelo por Metales Pesados*. Mexico: Universidad Autonoma de Yucatan.
- Bowen, C. (1979). *Contaminacion de Suelos*. Madrid: Universidad de Andalucía.
- Chaney, R., Ying-Ming, L., & Homer, Z. (1995). *Potential use of hyperaccumulators Minig Environmental Management*. EE.UU.: Homer Green.
- Corpus, M. Y. (2016). *Eficiencia de especies altoandinas como plantas fitorremediadoras de suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de minerales Santa Rosa de Jangas, en condiciones de invernadero 2015, 2016*. Huaraz, Ancash, Perú: UNASAM.

- DIGESA. (2008). *Monitoreo del río San Juan - Mantaro y Principales*. Programa Nacional de Vigilancia de la Calidad de los Recursos Hídricos, DESASs Pasco, Junín, Ayacucho, Huancavelica. Lima: Ministerio de Salud.
- Dirección General de Salud Ambiental. (2007). *www.digesa.gob.pe*.
Obtenido de *www.digesa.gob.pe*
- Doe Run Peru. (Marzo de 2015). *Doe Run Peru*. Obtenido de Doe Run Peru.: <http://www.doerun.com.pe>
- 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*. Barcelona: UB.
- Enoc, J.-P., José, G., Haydeé, M., Magda, C., Mauro, M., & Noema, C. (Agosto de 2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, 145-154. doi:doi:
<http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817>
- Fernandez, P. R. (2018). *Fitorremediación*. Bogotá: Lupesa.
- García, I., & Dorronsoro, C. (2003). *Contaminación del Suelo*. España: Universidad de Granada.
- García, I., & Dorronsoro, C. (2003). *Contaminación del Suelo*. España: Universidad de Granada.
- García, I., & Dorronsoro, C. (2005). *Contaminación por metales pesados*. Granada: Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- Guerrero, J. (1998). Uso y Degradación del Suelo. *Curso Internacional Sobre Uso de La Información de Peligros Naturales en la Preparación de Proyectos de Inversión* (págs. 1-10). Lima: UNALM.
- Han, S. (2003). El Suelo un Indicador de la Contaminación.
- Hinojosa, C. (2016). Concentración Gravimétrica de Menas Auíferas. *Revista Metalúrgica UTO*, 50-62.
- INEI. (2007). *Censo Poblacional 2007*. Lima: INEI.
- INEI. (24 de 09 de 2017). *Resultados definitivos Censo 2017*. Obtenido de <http://censo2017.inei.gob.pe>:
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1563/

- ITGE. (1995). *Contaminacion y Depuracion de Suelos*. EE.UU.: Publicaciones ITGE.
- Lui, Z., Chen, B., Wang, L.-a., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123138
- Mantaro Revive. (2015). *Arzobispado Huancayo*. Obtenido de Mantaro Revive: <http://elmantarorevive.blogspot.com/>
- Marcera, D. (2019). Logros y Retos del Desarrollo Económico Social de Puno. *Foro Puno 2019* (pág. 24). Puno: Instituto Peruano de Economía.
- Marrero, A. (25 de 07 de 2019). *lifeder.com*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/ichu/>
- Marrugo, J., Durango, J., Diaz, L., Urango, I., Araméndiz, H., Vergara, V., . . . Díez, S. (2020). Transfer and bioaccumulation of mercury from 5 soil in cowpea in 6 gold mining sites. *Chemosphere*. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126142.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *www.minam.gob.pe*. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe>
- Ministerio del Ambiente. (2015, 02 13). *MINAM*. Retrieved from Sinia Minam web site: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo>
- Ministerio del Ambiente. (octubre de 2017). *www.minam.gob.pe*. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe>
- Ministerio del Ambiente. (sabado de diciembre de 2017). Aprueban Estandares de Calidad Ambiental ECA para Suelo. *El Peruano*, págs. 12,13,14,15.
- Orozco, C., Perez, A., Gonzales, N., Alfayete, J., & Rodriguez, C. (2003). *Contaminacion Ambiental*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo.
- Ortiz, R., & Aranibar, M. (2015). Plantas acumuladoras de metales en relaves mineros del altiplano de la región Puno. *Revista científica de investigación andina*, 96-107. Retrieved 08 2018
- Pagnanell, C. (2011). *Movilizacion de Contaminantes en el Suelo*. Bogota: Medellin.

- Porta, J. (2003). *Edafología* (3ra edición ed.). Bogotá: Ediciones Mundi Prensas. Recuperado el 2017
- Rodríguez, L. C. (2014). *Fitoremediación con especies nativas de los suelos*. Lima: UNALM.
- Sauquillo. (2003). *La Importancia del Suelo como Economía*. Lima: Limusa.
- Sepulveda, T. (2016). *Tecnologías de Remediación de Suelos Contaminados*. Madrid: Lopesa.
- SNMPR. (12 de 02 de 2020). *Sociedad Nacional de Minas, Petróleo y Energía*. Obtenido de snmpe web site: www.snmpe.org.pe
- Teng, D., Mao, K., Ali, W., Xu, G., Huang, G., Khan, N., . . . Zhang, H. (2020). Describing the toxicity and sources and the remediation technologies for mercury contaminated. *The Royal Society of Chemistry*, 10, 23221–23232. doi:10.1039/d0ra01507e
- Torres, A. (2018). Factor de bioconcentración y translocación de especies altoandinas para suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de Mesapata en condiciones de invernadero 2015,2016. Huaraz, Ancash, Peru: UNASAM.
- Toxicas, A. P. (1999). *Resumen de Salud Pública de Chile*. Santiago: Ministerio de Salud Pública.
- USEPA. (2012). *Hazardous waste cleanup information*. Obtenido de Technology Innovatio Office: www.cluin.org
- Venegas, C. (2016). *Capacidad de extracción de la especie Stipa Ichu en los pasivos ambientales mineros en la planta concnetradora de Huari-La Oroya*. Lima: UAP.
- Vidal, J. V., Marrugo, J. L., Jaramillo, B., & Pérez, L. M. (2010). Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando Guarumo (*Cecropia Peltata*). *Ingeniería y Desarrollo*(27), 113-119. Retrieved 2020
- Warren, D., Glor, R., & Turelli, M. (2010). A toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 607 - 611.

7 ANEXOS.

Cuadro 34: Control de crecimiento de las plantas de *Festuca dolichopylla* empleadas en la fitorremediación.

Experimento	Especie	Longitud de la planta (cm)	# de hojas	# de hojas con clorosis	# de hojas con necrosis
Prueba control (mes 0)	<i>Festuca dolichopylla</i>	18	23	0	0
		16	24	0	0
		15	27	0	0
Prueba control (mes 3)	<i>Festuca dolichopylla</i>	19	23	0	0
		17	24	0	0
		16	27	0	0
Prueba control (mes 6)	<i>Festuca dolichopylla</i>	20	23	0	0
		18	24	1	0
		17	26	0	0
Prueba control (mes 9)	<i>Festuca dolichopylla</i>	21	23	0	0
		19	24	1	0
		18	25	0	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 0)	<i>Festuca dolichopylla</i>	17	27	0	0
		18	28	0	0
		16	30	0	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 3)	<i>Festuca dolichopylla</i>	18	27	0	0
		19	28	0	0
		18	30	1	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 6)	<i>Festuca dolichopylla</i>	19	27	0	0
		20	28	0	0
		19	29	1	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 9)	<i>Festuca dolichopylla</i>	20	27	0	0
		21	28	0	0
		20	29	1	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 0)	<i>Festuca dolichopylla</i>	17	24	0	0
		16	28	0	0
		19	25	0	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 3)	<i>Festuca dolichopylla</i>	17	24	0	0
		16	28	0	0
		19	25	0	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 6)	<i>Festuca dolichopylla</i>	18	24	0	0
		17	28	1	0
		20	25	0	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 9)	<i>Festuca dolichopylla</i>	18	24	0	0
		17	28	1	0
		20	25	0	0
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 0)	<i>Festuca dolichopylla</i>	23	21	0	0
		20	22	1	0
		17	24	0	0
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 3)	<i>Festuca dolichopylla</i>	24	21	0	0
		21	22	1	0
		18	24	0	0
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 6)	<i>Festuca dolichopylla</i>	25	21	0	0
		22	22	1	0
		19	23	0	1
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 9)	<i>Festuca dolichopylla</i>	25	21	0	0
		19	22	1	0
		20	23	0	0

Cuadro 35: Control de crecimiento de las plantas de *Stipa ichu* empleadas en la fitorremediación.

Experimento	Especie	Longitud de la planta (cm)	# de hojas	# de hojas con clorosis	# de hojas con necrosis
Prueba control (mes 0)	<i>Stipa ichu</i>	14	19	0	0
		16	22	0	0
		15	26	0	0
Prueba control (mes 3)	<i>Stipa ichu</i>	15	19	0	0
		17	22	0	0
		16	26	0	0
Prueba control (mes 6)	<i>Stipa ichu</i>	16	19	0	0
		18	22	0	0
		17	26	0	0
Prueba control (mes 9)	<i>Stipa ichu</i>	17	19	0	0
		19	22	0	0
		18	25	1	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 0)	<i>Stipa ichu</i>	16	20	0	0
		15	24	0	0
		16	23	0	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 3)	<i>Stipa ichu</i>	17	20	0	0
		16	24	0	0
		17	23	1	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 6)	<i>Stipa ichu</i>	18	20	0	0
		17	24	0	0
		18	22	0	0
Suelo contam sin tratam quim (mes 9)	<i>Stipa ichu</i>	19	20	0	0
		18	24	0	0
		19	22	1	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 0)	<i>Stipa ichu</i>	14	24	0	0
		16	28	0	0
		15	25	0	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 3)	<i>Stipa ichu</i>	15	24	0	0
		17	28	0	0
		16	25	0	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 6)	<i>Stipa ichu</i>	16	24	0	0
		18	28	0	0
		17	25	1	0
Suelo contam ioduro 2g/kg (mes 9)	<i>Stipa ichu</i>	17	24	0	0
		19	28	0	0
		18	25	0	0
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 0)	<i>Stipa ichu</i>	14	21	0	0
		15	22	0	0
		16	19	0	0
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 3)	<i>Stipa ichu</i>	15	21	0	0
		16	22	0	0
		17	19	0	0
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 6)	<i>Stipa ichu</i>	16	21	0	0
		17	22	0	0
		18	20	0	1
Suelo contam tiosulfato 2g/kg (mes 9)	<i>Stipa ichu</i>	17	21	0	0
		18	22	0	0
		19	20	0	0

Lugares de muestreo de suelos contaminados con Mercurio.



Ilustración 1: **Pampa Blanca**



Ilustración 2: **La Rinconada**



Ilustración 3: **Ananea**

Ubicación de puntos de muestreo.

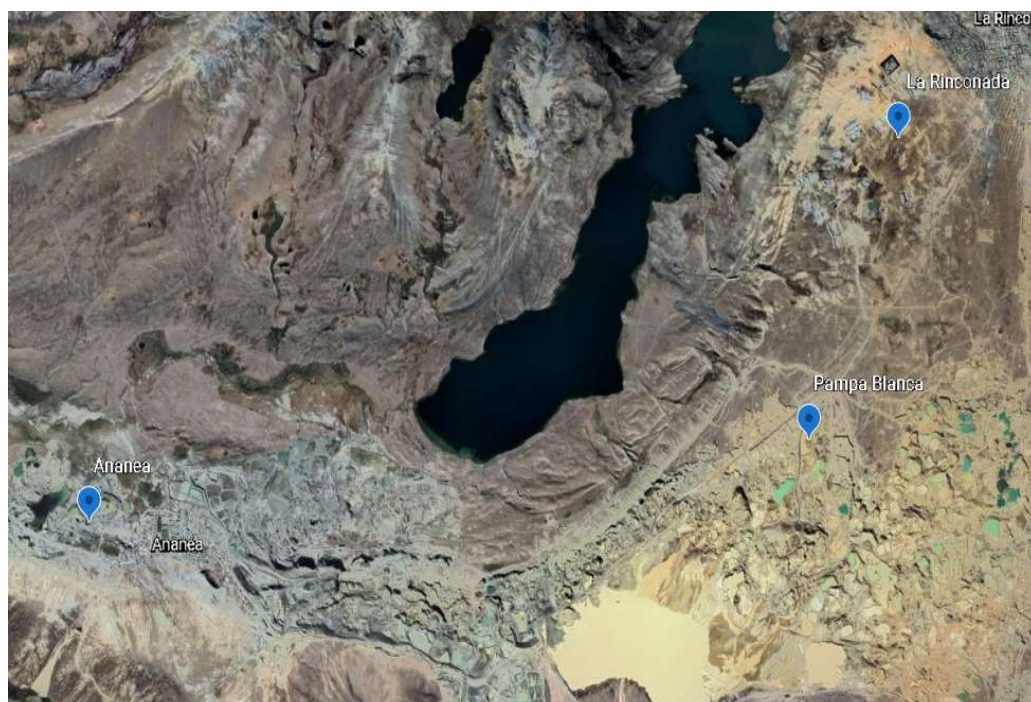


Ilustración 4: Ubicación de los puntos de muestreo.

Muestreo de especies vegetales (*Stipa ichu* Ruiz & Pav).



Ilustración 5: Muestreo de *Stipa Ichu* Ruiz & Pav