

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Fitorremediación con *Lupinus mutabilis* Sweet “Tarwi” y *Vicia faba* L. “Haba” en suelos contaminados con diferentes niveles de plomo

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

Jefferson Robert Astete Pizan

ASESOR

Roger Manuel Mestas Valero

Lima, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor

| | |
|-----------------------------------|--|
| Nombres | |
| Apellidos | |
| Tipo de documento de identidad | |
| Número del documento de identidad | |
| Número de Orcid (opcional) | |

Datos del asesor

| | |
|-----------------------------------|--|
| Nombres | |
| Apellidos | |
| Tipo de documento de identidad | |
| Número del documento de identidad | |
| Número de Orcid (obligatorio) | |

Datos del Jurado

Datos del presidente del jurado

| | |
|-----------------------------------|--|
| Nombres | |
| Apellidos | |
| Tipo de documento de identidad | |
| Número del documento de identidad | |

Datos del segundo miembro

| | |
|-----------------------------------|--|
| Nombres | |
| Apellidos | |
| Tipo de documento de identidad | |
| Número del documento de identidad | |

Datos del tercer miembro

| | |
|-----------------------------------|--|
| Nombres | |
| Apellidos | |
| Tipo de documento de identidad | |
| Número del documento de identidad | |

Datos de la obra

| | |
|--|--|
| Materia* | |
| Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado: | |
| Idioma (Normal ISO 639-3) | |
| Tipo de trabajo de investigación | |
| País de publicación | |
| Recurso del cual forma parte (opcional) | |
| Nombre del grado | |
| Grado académico o título profesional | |
| Nombre del programa | |
| Código del programa Consultar el listado: | |

*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 037 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 03:00 p.m. del miércoles 20 de setiembre de 2023, a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Amada Victoria Larco Aguilar | Presidente |
| 2. Mario Antonio Anaya Raymundo | Primer miembro |
| 3. Segundo Octavio Zegarra Aliaga | Segundo miembro |
| 4. Roger Manuel Mestas Valero | Asesor(a) |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Fitorremediación con *Lupinus mutabilis* Sweet “Tarwi” y *Vicia faba* L. “Haba” en suelos contaminados con diferentes niveles de plomo**, que presenta el bachiller en **Ciencias Ambientales**, **Jefferson Robert Astete Pizan**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR **X**
DESAPROBAR ...

La tesis, con el calificativo de **SUFICIENTE** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare EXPEDITA para conferirle el TÍTULO de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 20 de setiembre de 2023.

Amada Victoria Larco Aguilar
Presidente

Mario Antonio Anaya Raymundo
1° miembro

Segundo Octavio Zegarra Aliaga
2° miembro

Roger Manuel Mestas Valero
Asesor(a)

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE **TESIS** / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Lima, 13 de diciembre de 2023

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ingeniería Agraria

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con título: **Fitorremediación con *Lupinus mutabilis* Sweet "Tarwi" y *Vicia faba* L. "Haba" en suelos contaminados con diferentes niveles de plomo**, presentado por **Jefferson Robert Astete Pizan** (código de estudiante **2012100381** y DNI **46988437**) para optar el título profesional/ grado académico de **Ingeniero Ambiental** ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 0 %** (poner el valor del porcentaje).* Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,



Firma del Asesor (a)
DNI N°: 23842285
ORCID: 0000-0002-5097-9988
Facultad de Ingeniería Agraria - UCSS

* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, por guiarme e inculcarme buenos valores y hacer de mí una gran persona. A mis sobrinos Archie y Alessia por levantarme los ánimos con cada sonrisa, cada vez que llego a casa. A mis hermanos, por sus consejos y ocurrencias. A toda mi familia y amigos que creyeron en mí.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme seguir adelante y hacer posible esta investigación.

Agradecer especialmente a mis padres Tomas Astete Sánchez y Alejandra Pizan Guillen por ser el motor y motivo para la realización de la tesis, en especial por haberme aguantado en cada etapa de mi vida universitaria y en la realización de este presente trabajo.

A mi asesor Dr. Roger Manuel Mestas Valero por su tiempo y disposición dedicado a la asesoría, de igual manera agradecer al Blgo. Armando Chiclla Salazar por sus conocimientos brindados y su constante apoyo para resolver dudas en la realización de la presente investigación.

Por último, agradecer a Carlos Nomberto Conde y Jean Campos Ventura, amigos desde la universidad, gracias por sus consejos y la linda experiencia de trabajar con ustedes.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|--|-----------|
| Índice general | viii |
| Índice de tablas | x |
| Índice de figuras | xi |
| Índice de apéndice | xii |
| Resumen | xiii |
| Abstract..... | xiv |
| Introducción..... | 1 |
| Objetivos..... | 3 |
| CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.1. Antecedentes | 4 |
| 1.2. Bases teóricas especializadas | 10 |
| 1.2.1. Fitorremediación | 10 |
| 1.2.2. Mecanismos de la fitorremediación | 11 |
| 1.2.3. Morfología <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet “tarwi” | 13 |
| 1.2.4. Morfología <i>Vicia faba</i> L. “haba” | 14 |
| 1.2.5. Suelos contaminados..... | 15 |
| 1.2.6. Metales pesados..... | 15 |
| CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS | 16 |
| 2.1. Diseño de la investigación..... | 16 |
| 2.2. Lugar y fecha | 16 |
| 2.3. Descripción del experimento | 16 |
| 2.4. Tratamientos | 20 |
| 2.5. Unidades experimentales | 20 |
| 2.6. Identificación de variables y su mensuración | 20 |
| 2.7. Diseño estadístico del experimento | 25 |
| 2.8. Análisis estadístico de datos | 25 |
| 2.9. Materiales..... | 25 |
| 2.9.1. Material biológico | 25 |
| 2.9.2. Materiales para el crecimiento de la planta | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 2.9.3. Materiales de laboratorio | 26 |
| 2.9.4. Equipos | 26 |
| CAPÍTULO III: RESULTADOS | 27 |
| 3.1. Resultados de índice de supervivencia de “haba” y “tarwi” | 27 |
| 3.2. Resultados de la variación de potencial de hidrógeno (pH) en el suelo para los distintos tratamientos..... | 29 |
| 3.3. Resultados de la concentración de plomo en los cultivos de “haba” y “tarwi” | 31 |
| 3.4. Resultados de los valores promedio de la remoción de plomo en suelo, en términos de porcentaje (%) | 36 |
| 3.5. Resultados de la variación promedio de fósforo en el suelo | 38 |
| 3.6. Resultados para el factor de traslocación de plomo para el cultivo de “haba” y “tarwi” | 40 |
| CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN | 43 |
| 4.1. Índice de supervivencia | 43 |
| 4.2. Concentración y remoción de plomo en el suelo | 43 |
| 4.3. Concentración de fósforo en el suelo..... | 46 |
| 4.4. Factor de traslocación | 46 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES..... | 48 |
| CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES | 49 |
| REFERENCIAS..... | 50 |
| TERMINOLOGÍA | 58 |
| APÉNDICES | 60 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. <i>Tratamientos del experimento</i> | 20 |
| Tabla 2. <i>Variables y su mensuración</i> | 21 |
| Tabla 3. <i>Arreglo factorial</i> | 25 |
| Tabla 4. <i>Resultados del índice de supervivencia en el cultivo de “haba” y “tarwi” (promedio±DS)</i> | 28 |
| Tabla 5. <i>Potencial de hidrógeno (pH) para el cultivo de “haba” y “tarwi” (promedio±DS)</i> | 30 |
| Tabla 6. <i>Valores promedio de la concentración del plomo (mg/L) en el cultivo con “haba” a nivel de suelo, tallo y raíz en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)</i> | 33 |
| Tabla 7. <i>Valores promedio de la concentración de plomo (mg/L) en el cultivo con “tarwi” a nivel de suelo, tallo y raíz en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)</i> | 35 |
| Tabla 8. <i>Valores promedio de remoción de plomo (%) en el cultivo con “haba”, a nivel de suelo en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)</i> | 37 |
| Tabla 9. <i>Valores promedio de remoción de plomo (%) en el cultivo con “tarwi”, a nivel de suelo en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)</i> | 37 |
| Tabla 10. <i>Valor promedio de fósforo (mg/L) en el cultivo con “haba” y “tarwi” en suelo (promedio±DS)</i> | 39 |
| Tabla 11. <i>Factor de Traslocación (FT) en cultivo de “haba” y “tarwi”</i> | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| <i>Figura 1.</i> Mecanismos de la fitorremediación | 13 |
| <i>Figura 2.</i> Selección de semillas en buen estado | 17 |
| <i>Figura 3.</i> Preparación del sustrato y desinfección de semillas | 18 |
| <i>Figura 4.</i> Preparación de soluciones..... | 19 |
| <i>Figura 5.</i> Fotómetro WTW pHotoFlex y reactivos para análisis de plomo | 22 |
| <i>Figura 6.</i> Medición de fósforo..... | 23 |
| <i>Figura 7.</i> Etapas para el cálculo del factor de traslocación | 24 |
| <i>Figura 8.</i> Gráfico del índice de supervivencia para el cultivo de “haba” y “tarwi” con sus distintos tratamientos y control..... | 29 |
| <i>Figura 9.</i> Gráfico de la variación de potencial de hidrógeno (pH) de “haba” y “tarwi” para los distintos tratamientos y control..... | 31 |
| <i>Figura 10.</i> Comparación de la concentración de plomo para el cultivo de “haba” y “tarwi” en suelo, tallo y raíz..... | 36 |
| <i>Figura 11.</i> Variación de fósforo (mg/L) para el cultivo de “haba” y “tarwi” en los distintos tratamientos y control..... | 40 |
| <i>Figura 12.</i> Factor de traslocación para el cultivo de “haba” y “tarwi” en los distintos tratamientos y control | 42 |
| <i>Figura 13.</i> Protocolo de ensayo para Plomo..... | 69 |
| <i>Figura 14.</i> Protocolo de ensayo de Fósforo..... | 70 |
| <i>Figura 15.</i> Colocación de la semilla de tarwi en suelo contaminado con plomo. | 71 |
| <i>Figura 16.</i> Colocación de la solución nutritiva en los tratamientos. | 71 |
| <i>Figura 17.</i> Masetas con semillas de haba y tarwi después de 14 días. | 72 |
| <i>Figura 18.</i> Masetas con semillas de haba y tarwi después de 21 días. | 73 |
| <i>Figura 19.</i> Masetas con semillas de haba y tarwi después de 40 días. | 74 |
| <i>Figura 20.</i> Masetas con semillas de haba y tarwi después de 60 días. | 75 |
| <i>Figura 21.</i> Pasaje de la muestra de suelo y adición de HNO ₃ para su análisis..... | 76 |
| <i>Figura 22.</i> Muestras de suelo de haba y tarwi para su análisis. | 76 |
| <i>Figura 23.</i> Muestras listas para ser analizadas por el fotómetro. | 77 |

ÍNDICE DE APÉNDICE

| | Pág. |
|---|------|
| Apéndice 1. Resultados de ANOVA de un factor para haba..... | 60 |
| Apéndice 2. Resultados de ANOVA de un factor para tarwi | 61 |
| Apéndice 3. Prueba de Tukey para el Índice de supervivencia en haba | 62 |
| Apéndice 4. Prueba de Tukey para pH en haba | 62 |
| Apéndice 5. Prueba de Tukey para suelo en haba | 63 |
| Apéndice 6. Prueba de Tukey para tallo en haba..... | 63 |
| Apéndice 7. Prueba de Tukey para raíz en haba..... | 64 |
| Apéndice 8. Prueba de Tukey para Fósforo en haba | 64 |
| Apéndice 9. Prueba de Tukey para el Factor de Traslocación (FT) en haba..... | 65 |
| Apéndice 10. Prueba de Tukey para el Índice de supervivencia en tarwi | 65 |
| Apéndice 11. Prueba de Tukey para pH en tarwi | 66 |
| Apéndice 12. Prueba de Tukey para suelo en tarwi..... | 66 |
| Apéndice 13. Prueba de Tukey para tallo en tarwi | 67 |
| Apéndice 14. Prueba de Tukey para raíz en tarwi | 67 |
| Apéndice 15. Prueba de Tukey para Fósforo en tarwi..... | 68 |
| Apéndice 16. Prueba de Tukey para el Factor de Traslocación (FT) de tarwi | 68 |
| Apéndice 17. Protocolo de ensayo para Plomo (Pb) | 69 |
| Apéndice 18 Protocolo de ensayo de Fósforo (P)..... | 70 |
| Apéndice 19. Registro fotográfico de la investigación..... | 71 |

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la fitorremediación con *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” y *Vicia faba* L. “haba” en suelos contaminados con diferentes niveles de plomo. La investigación se llevó a cabo en el invernáculo de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, con el planteamiento de un diseño completamente aleatorio (DCA) con cuatro tratamientos y tres réplicas, haciendo un total de 30 unidades experimentales que fueron sometidas a condiciones de invernadero. Los tratamientos corresponden a T0 control (Suelo + Solución nutritiva), T1 (2 mg Pb(NO₃)₂ (suelo) + Solución nutritiva), T2 (4 mg Pb(NO₃)₂ (suelo) + Solución nutritiva), T3 (8 mg Pb(NO₃)₂ (suelo) + Solución nutritiva) y T4 (16 mg Pb(NO₃)₂ (suelo) + Solución nutritiva). Los resultados indicaron que el índice de supervivencia promedio más alto se obtuvo en T3 (1,02 ± 0,08) y el valor más bajo se obtuvo en T1 (0,66 ± 0,04) sometidos a 60 días de exposición al metal pesado plomo en *Vicia faba* L. Por otra parte, las concentraciones más altas de plomo en el suelo, tallo y raíz se presentaron en haba, siendo T1 (5,94 ± 0,06 mg/L), T4 (1,70 ± 0,10 mg/L) y T1 (2,94 ± 0,13 mg/L) respectivamente. De la misma manera, la concentración más alta de fósforo en el suelo para haba se obtuvo en T1 (5,8 ± 0,2 mg/L) y para tarwi en T1 (6,2 ± 0,5 mg/L). El pH presenta valores de 7,0 a 8,6 lo cual expresa que el suelo tiende a ser alcalino. Se concluyó que *Vicia faba* L. presenta mayor remoción de plomo en el suelo en condiciones de invernadero, siendo el tratamiento T4 el que presentó el porcentaje más alto (90,80 ± 0,82 %); de igual manera *Lupinus mutabilis* Sweet obtuvo un mayor porcentaje de remoción de plomo en el tratamiento T4 (86,95 ± 0,54 %). En base a los resultados se determina que el haba tiene mayor capacidad de fitorremediación.

Palabra clave: Fitorremediación, *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi”, *Vicia faba* L. “haba”, índice de supervivencia, remoción, factor de traslocación.

ABSTRACT

The present investigation was aimed at objective to evaluate phytoremediation with *Lupinus mutabilis* Sweet "tarwi" and *Vicia faba* L. "haba" in soils contaminated with different levels of lead. The investigation was carried out in the greenhouse of the University Catolica Sedes Sapientiae, with the approach of a completely randomized design (DCA) with four treatments and three replicas, marking a total of 30 experimental units that were subjected to greenhouse conditions. Treatments correspond to T0 control (Soil + Nutrient solution), T1 (2 mg Pb(NO₃)₂ (soil) + Nutrient solution), T2 (4 mg Pb(NO₃)₂ (soil) + Nutrient solution), T3 (8 mg Pb(NO₃)₂ (soil) + Nutrient solution) and T4 (16 mg Pb(NO₃)₂ (soil) + Nutrient solution). The results indicated that the highest average survival rate was obtained at T3 (1,02 ± 0,08) and the lowest value was obtained at T1 (0,66 ± 0,04) subjected to 60 days of exposure to heavy metal lead in *Vicia faba* L. On the other hand, the highest concentrations of lead in the soil, stem and root were in haba, being T1 (5,94 ± 0,06 mg /L), T4 (1,70 ± 0,10 mg /L) and T1 (2,94 ± 0,13 mg /L) respectively. In the same way, the highest phosphorus concentration in the soil for haba was obtained in T1 (5,8 ± 0,2 mg /L) and for tarwi in T1 (6,2 ± 0,5 mg /L). The pH has values of 7,0 to 8,6 which expresses that the soil tends to be alkaline. It was concluded that *Vicia faba* L. has greater removal of lead in the soil in greenhouse conditions, with the T4 treatment being the one whit the highest percentage (90,80 ± 0,82%); similarly, *Lupinus mutabilis* Sweet obtained a higher percentage of lead removal in the T4 (86,95 ± 0,54 %). Based on the results it is determined that the bean has a greater capacity for phytoremediation.

Key words: Phytoremediation, *Lupinus mutabilis* Sweet "tarwi", *Vicia faba* L. "haba", survival rate, removal, translocation factor.

INTRODUCCIÓN

Los suelos contaminados representan un gran problema para algunas especies que provocan la pérdida de productividad y disminución de la biodiversidad, es por ello que existen especies de plantas que adoptan mecanismos para resistir, tolerar y sobrevivir a suelos con elevadas concentraciones de contaminantes. En su mayoría, las diferentes especies de plantas que son tolerantes a los contaminantes, presentan un mecanismo que no permite la entrada del contaminante hacia la raíz y propagación hacia los tejidos donde se realiza la fotosíntesis, por este motivo, la utilización de plantas para extraer metales pesados de los suelos (Pb, Zn y Cd) es considerada como una de las tecnologías más útiles para su remediación y recuperación. Esta práctica es conocida como fitorremediación y puede utilizarse para degradar, extraer e inmovilizar contaminantes como metales pesados (Becerril *et al.*, 2007). Bajo este argumento, la fitorremediación se considera como un método *in-situ* y eficaz que mediante un mecanismo de absorción transporte y secuestro de metales pesados los convierte en contaminantes ambientalmente inofensivos por lo que sus costos son baratos (Eapen y D'Souza, 2005).

Por otro lado, la semilla *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” favorece significativamente la seguridad alimentaria ya que presenta un alto potencial nutritivo para las poblaciones andinas (madres lactantes y niños en etapa de crecimiento), además ayuda a prevenir enfermedades crónicas. Desde el punto de vista ecológico, el “tarwi” ayuda a la captación y fijación del nitrógeno atmosférico en el suelo (Canahua y Roman, 2016). Una de las ventajas del “tarwi” es de que se adapta a diferentes altitudes y que por muchos años se ha utilizado para enriquecer los suelos altoandinos (Suca y Suca, 2015).

Mientras que *Vicia faba* L. “haba” especie de las zonas altoandinas es considerado como un cultivo importante, dentro de la familia de las leguminosas. Desde el punto de vista agrícola, el “haba” tiene el rol fundamental de ser una especie de rotación, de abono verde y fijación de nitrógeno. Para las poblaciones andinas es una fuente de proteínas siendo también utilizado como alimento para el ganado, por lo que se considera esencial para la seguridad alimentaria (Balderrama *et al.*, 2001).

Los suelos contaminados no se pueden evaluar directamente, en efecto se convierten en un peligro, producto de esto trae grandes consecuencias a la seguridad alimentaria, ya que el suelo contaminado obstaculiza el metabolismo de las plantas y reduce el rendimiento en la agricultura, haciendo que los cultivos sean dañinos para el consumo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2018). En diferentes estudios se han demostrado que las especies de leguminosas ayudan a la recuperación de suelos. Es por ello, que la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la fitorremediación con *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” y *Vicia faba* L. “haba” en suelos contaminados con diferentes niveles de plomo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la fitorremediación con *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” y *Vicia faba* L. “haba” en suelos contaminados con diferentes niveles de plomo.

Objetivos específicos

- Evaluar la remoción de plomo por *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” y *Vicia faba* L. “haba”.
- Evaluar la variación del fósforo presente en el suelo en los distintos tratamientos.
- Determinar el factor de traslocación de plomo en *Vicia faba* L. “haba” y *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi”.
- Determinar el índice de supervivencia de *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” y *Vicia faba* L. “haba” sometidos a suelos contaminados con plomo.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Ámbito internacional

Coyago y Bonilla (2016) realizaron una investigación titulada “Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano”, las especies empleadas para la investigación fueron *Amaranthus hybridus* L. “amaranto”, *Beta vulgaris* L. “acelga” y *Medicago sativa* L. “alfalfa” (Universidad Politécnica Selesiana-Ecuador). El objetivo de la investigación fue determinar la cantidad de plomo absorbida en tiempos diferentes en las tres especies. Como parte del experimento realizaron la germinación haciendo uso de tierra negra y una mezcla de tierra negra, cascajo y abono orgánico (tierra mezcla), para luego ser replantadas en suelos contaminados artificialmente con plomo a diferentes concentraciones (2,5; 5 y 10 %). Para la absorción de plomo de las especies vegetativas utilizaron la técnica de absorción ácida, mientras que para la cuantificación emplearon el espectrofotómetro, el monitoreo y las mediciones se dieron en los intervalos de (0, 20, 30, 45, 60 y 90) días. Como resultado del análisis de la absorción de plomo fue determinado que había una influencia directa en cuanto a la biomasa generada, así mismo, los suelos empleados para la germinación presentaron valores de pH 7,1 en tierra negra y 7,5 en tierra mezcla considerados suelos medianamente alcalinos, por otra parte, la germinación de las especies en tierra negra obtuvo valores de 75 y 100 % para tierra mezcla lo cual indicó que hubo un óptimo desarrollo de las especies. Los autores concluyeron que el amaranto había presentado diferentes etapas de desintoxicación, mientras que por otra parte la “alfalfa” y la “acelga” presentaron una absorción continua.

Bonilla (2013) realizó una investigación denominada “Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación”, en la provincia de Pichincha-Ecuador. El objetivo del estudio fue

determinar el porte del “amaranto”, “acelga” y “alfalfa”, usando como técnica la fitoextracción. Como parte de la metodología, las semillas fueron germinadas siguiendo ciertos parámetros: Crecimiento y desarrollo bajo condiciones controladas de invernadero, por otro lado, fueron agregados abono orgánico y nutrientes para su desarrollo y crecimiento. Fue empleada la técnica de absorción atómica por llama la cual permitió cuantificar la concentración de plomo en los suelos iniciales que no fueron expuestos a contaminación, así mismo, para suelos que fueron expuestos a contaminación durante 20, 30, 45, 60 y 90 días de exposición de las tres especies y por último fue cuantificado el suelo final fitorremediado. Los resultados demostraron que, al utilizar abono orgánico las especies presentaron una mayor cantidad de remoción de plomo por medio de la absorción, a diferencia de las especies que fueron germinadas sin el abono orgánico. Finalmente, el autor concluyó que el abono o los nutrientes son un factor clave para el crecimiento y desarrollo de las plantas, por lo tanto, las especies presentarían un mayor follaje. Una excelente característica observada fue que había una mayor concentración de plomo por medio de la absorción, esto era generado al momento del trasplante al suelo contaminado.

García *et al.* (2012) evaluaron la respuesta de *Vicia faba* L. “haba” cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. El objetivo fue determinar el grado de impacto que pudiera generar el cadmio sobre la evolución del “haba”, a nivel de toda su estructura, desde la raíz hasta la vaina. La investigación estableció un diseño unifactorial al azar con cuatro repeticiones por concentraciones de Cd obteniendo un total de 12 unidades experimentales. Inicialmente el suelo presentó una concentración de 4,1 mg/kg de cadmio, posteriormente fueron añadidos los tratamientos (20 mg/kg y 40 mg/kg) de cadmio como contaminante. Las variables agronómicas a medir fueron altura de planta (AP), número de vainas (NV), longitud de raíz (LR), volumen radical (VR) y biomasa seca total (BST). El análisis estadístico utilizado en la investigación fue un análisis de varianza, en tanto para la comparación de medias usaron la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Por lo tanto, la relación del análisis de varianza ($p < 0,05$) indicó que la (AP), (NV), (LR), (VR) y (BST) no mostraron diferencias significativas entre ellos. Se observó una relación directamente proporcional en el color de los nudos y la concentración de Cd, a medida que el Cd aumenta, hay una variación de color oscuro en los nudos por consiguiente la clorofila a y b es mayor. Por último, el “haba” fue quien absorbió mayor cantidad de Cd, en relación de 8,6 y 65,2 mg/kg,

lo que indica que la planta de haba puede considerarse como potencial acumulador de Cd. Los autores concluyeron que el “haba” absorbió una mayor concentración de Cd en la raíz.

García *et al.* (2011) realizaron una investigación cuyo título fue “Contenido y Traslocación de plomo en *Avena sativa* L. “avena” y *Vicia faba* L. “haba” de un suelo contaminado”, en el municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros-México. El objetivo del estudio fue determinar el grado de impacto del plomo mediante factor de traslocación y bioconcentración en las dos especies. Como parte de la metodología, desarrollaron un diseño unifactorial, que constó de tres tratamientos de 50, 100 y 150 mg de plomo por kg de suelo, más un tratamiento control, llegando a formar 10 repeticiones de cada uno y haciendo un total de 40 unidades experimentales por cada especie (haba y avena). Las especies de plantas fueron cosechadas después de dos meses (60 días) y posteriormente fueron medidas las variables como biomasa, altura y volumen de la planta. Asimismo, se midió la concentración de plomo en el suelo. El análisis estadístico utilizado en la investigación fue un análisis de varianza, en tanto para la comparación de medias usaron la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Por otra parte, para la cuantificación de Pb fue utilizado el método de espectrofotometría de absorción atómica. Como resultados obtuvieron el 28,48 % de Pb en suelo en la planta de “haba”, asimismo fue la que absorbió una mayor cantidad de plomo (55 mg/kg), a diferencia de la avena quien absorbió 45,3 mg/kg de plomo. Finalmente, los autores concluyeron que las raíces de las dos especies fueron los órganos que presentaron una mayor concentración de plomo, ya que tienen la capacidad de tolerar y absorber dicho metal.

Ámbito nacional

Díaz (2017) efectuó un estudio titulado “Capacidad de acumulación de la *Urtica urens* L. “ortiga” para la fitorremediación de suelos contaminados con plomo en la Oroya-Junín, 2017”. El objetivo del estudio fue determinar si la ortiga tiene capacidad de acumular plomo en sus diversos tejidos. Para este estudio, el autor recolectó muestras de suelo del centro metalúrgico Doe Run en La Oroya, Junín. La investigación fue de tipo experimental y como parte de la metodología utilizó un diseño experimental con 5 repeticiones, y los análisis fueron realizados antes y después del tratamiento para ver la variación de absorción del plomo. Los datos fueron procesados en el programa SPSS versión 21. El análisis estadístico utilizado en la investigación fue la prueba T-Student para datos relacionados o emparejados. Los resultados indicaron que la “ortiga” consiguió acumular 84,34 mg/kg en la parte de sus hojas y 25,06 mg/kg en la parte de sus raíces. Comparando la concentración inicial (1 119,51 mg/kg) y final (1 010,05 mg/kg), observaron que hubo una disminución de 109,046 mg/kg en cuanto al plomo, concluyéndose que la “ortiga” llegó a acumular plomo en la parte aérea de las hojas y en la parte baja de sus raíces.

León (2017) realizó un estudio denominado “Capacidad fitorremediadora de especies altoandinas para suelos contaminados por metales pesados procedentes de la compañía minera lincuna”, en Huaraz-Ancash. El objetivo del estudio fue, establecer que especies altoandinas son capaces de fitorremediar suelos contaminados. La investigación tuvo dos etapas, la primera estuvo enfocada en la propagación de 4 especies altoandinas y la segunda etapa consistió en determinar la mayor capacidad de propagación de 3 especies altoandinas expuestas a suelos contaminados con metales pesados y suelos de mina. Asimismo, las muestras fueron sometidas a análisis químicos para determinar en qué parte de la planta logra traslocar y bioconcentrar mayor plomo. Como resultados, mostraron un mayor índice en desarrollo de la especie altoandina *Achyrocline alata* (Kunth) DC., a diferencia de la especie *Werneria nubigena* (Kunth) que tuvo una evolución variable. Además, el análisis químico en la raíz de *Achyrocline alata* mostraron que concentro 4 808,08 mg/kg de plomo y 1 790,66 mg/kg en suelos contaminados con plomo. Por otro lado, la concentración de Zn fue mayor en la parte de la raíz (2 068,9 mg/kg), también evidenció una concentración significativa de Zn (397,30 mg/kg) comprendidas entre el tallo y hojas. Finalmente, *Werneria nubigena* y

Achyrocline alata mostraron un alto potencial fitorremediador a condiciones de invernadero. Ya que, estas condiciones fueron propicias para el desarrollo y germinación de las especies.

Maguiña (2017) efectuó un estudio titulado “Determinación de la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” en suelos contaminados con cadmio” (Universidad Ricardo Palma-Lima). El objetivo del estudio fue determinar la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi”. La investigación fue realizada a condiciones controladas de invernáculo. Las plantas fueron sometidas a 4 tratamientos (T1, T2, T3 y T4) y un control (T0), donde cada tratamiento estaba compuesto por (4, 8, 12 y 16 mg/kg de cadmio) respectivamente, luego se les añadió solución nutritiva a todos los tratamientos. Para cuantificar el Cd en la planta y sustrato, se empleó la técnica de espectrofotometría de absorción atómica de llama, a su vez se calculó el índice de supervivencia y tolerancia de las plantas hacia el Cd. Los resultados indicaron que la mayor acumulación de Cd, se dio en el tratamiento T4, registrando un alto valor de 3,13 mg/kg en las raíces, seguido por el tallo con 0,15 mg/kg, por último y en menor cantidad se dio en las hojas con 0,13 mg/kg, en cuanto al índice de tolerancia de *Lupinus mutabilis* Sweet disminuyó de 68,29 a 28,36 %, debido al aumento de la concentración del contaminante, mientras que la tasa de supervivencia más bajo fue en el tratamiento T4, con un valor de 0,33, teniendo en cuenta el tiempo que fueron expuestas las plantas al contaminante (65 días). Finalmente, el autor concluyó que la tasa de supervivencia, el índice de tolerancia y el efecto del Cd a nivel morfológico, demostraron que existe una capacidad de fitorremediación reducida, a medida que la concentración de Cd aumenta.

Paiva (2015) realizó una investigación denominada “Fitorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando *Amaranthus spinosus* L. “Amaranthaceae”, en Cusco, Perú el año 2012”. El objetivo fue evaluar la acumulación de plomo en diferentes niveles de la planta (raíz, tallo, hoja e inflorescencia) por el mecanismo de absorción. El experimento fue llevado a cabo en condiciones de invernadero, debido a que el suelo fue contaminado artificialmente con concentraciones de 0 (control), tratamiento T1 (200 mg/kg de plomo), tratamiento T2 (400 mg/kg de plomo) y tratamiento T3 (600 mg/kg de plomo). Fue trabajado con un diseño estadístico de bloques randomizados con un factorial de 3 x 4, donde utilizó 4 repeticiones; transcurridos 20 días de la contaminación fue trasplantado el *Amaranthus*

spinosus L., considerando una plántula por cada macetero. Transcurridos 136 días de haber culminado la floración, la planta fue extraída para su análisis respectivo, donde fue utilizado la técnica de absorción atómica. Como resultado estadístico de varianza de la prueba F, indicó un alto grado de significancia entre la planta y el plomo, siendo $p= 0,000$ ($p<0,05$ es significativo), asimismo, las interacciones entre las partes de la planta y la concentración de plomo (A*B) no presentaron efecto estadístico significativo $p= 0,103$. Por otro lado, la raíz absorbió 1,332 veces más que el tallo y 2,167 más que la inflorescencia, además, las hojas y tallo absorbieron 0,835 veces más que la inflorescencia. El autor concluyó que la especie de *Amaranthus spinosus* L. posee una capacidad que le permite soportar altas concentraciones de plomo, siendo los diversos tejidos de la planta los que absorben y acumulan dicho contaminante demostrando así la alta tolerancia a diferentes metales.

Chávez (2014) realizó una investigación denominada “Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo” realizada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, tuvo como objetivo determinar la capacidad fitorremediadora de especies de flora nativa encontradas en sitios contaminados por plomo. En este estudio fue empleado un diseño estadístico factorial, en la que consideró como factores a las tres especies de plantas y a los tres niveles de contaminantes, siendo su nivel de significancia de 0,01 % en un periodo de 60 días. Como parte de la metodología se ubicaron 12 puntos de muestreo, asimismo fueron recolectados 37 tipos de especies de plantas. Por otro lado, ambas especies (*Nicotiana* y *Calamagrostis*) en condiciones de campo acumularon 3 180 ppm en la parte radicular, 143 ppm en la parte aérea, 1 883 ppm en sus flores y 2 136 ppm en la parte de su tallo. Por otra parte, Vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) fue cultivada en condiciones de invernadero junto a las dos especies nativas con la finalidad de comparar cuál es su potencial fitorremediador. Los resultados mostraron que la especie *Nicotiana* presentó una mayor concentración de plomo en la parte radicular 276,7 ppm y 96,5 ppm en la parte aérea, mientras que la extracción de plomo fue de 0,3 mg de plomo y con factor de traslocación de 0,39. A diferencia de Vetiver quien presentó valores inferiores en la concentración de plomo. Finalmente, el autor concluyó que la *Nicotiana* posee un mayor potencial fitorremediador en su biomasa aérea.

Jara *et al.* (2014) realizaron una investigación titulada “Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas: *Solanum nitidum* Ruiz & Pay., *Brassica rapa* L., *Fuertesimalva echinata* (C. Presl) Fryxell, *Urtica urens* y *Lupinus ballianus* C.P. Sm., en suelos contaminados con metales pesados”, en el distrito de Lachaqui, provincia Canta-Lima. El objetivo principal fue evaluar la capacidad fitorremediadora de las cinco especies andinas. Para la realización de esta investigación fue necesario adaptar el lugar a condiciones de invernadero, el cual consistió en modificar ciertos factores ambientales como la temperatura, la humedad y la intensidad de la luz solar. Asimismo, emplearon un diseño experimental completamente al azar, considerando 20 tratamientos con 5 réplicas por tratamiento, formando un factorial completo de 5 x 4, donde 5 representan a las especies alto andinas y 4 a los tratamientos de sustratos con relave de mina 30, 60 y 100 % (RM) más un control que fue el suelo sin RM. Los autores evaluaron la biomasa de las cinco especies y la acumulación de plomo, zinc y cadmio. El análisis estadístico utilizado en la investigación fue un análisis de varianza. Como resultado del estudio, *Solanum nitidum*, *Brassica rapa*, *Fuertesimalva echinata*, *Urtica urens* y *Lupinus ballianus*, disminuyeron significativamente en cuanto a la producción de biomasa debido a que el tratamiento empleado fue de 100 % de relave de mina. La mayor acumulación de plomo y zinc la obtuvieron de la especie *Fuertesimalva echinata* y se da en la parte baja de sus raíces con tratamiento de (100 % RM). Por otro lado, el *Lupinus ballianus*, presentó alto grado de acumulación de cadmio en la parte de sus raíces, con concentraciones de 287,3 mg/kg de masa seca (MS) empleando el tratamiento de 100 % (RM). Por último, concluyeron que la especie de *Fuertesimalva echinata*, presentó una alta resistencia (41,5 %) al contaminante de relave minero.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Fitorremediación

La fitorremediación consiste en la utilización y empleo de especies de plantas, que mediante su mecanismo de absorción van a permitir remediar y degradar contaminantes que pueden estar presentes en el agua y el suelo. Surge como método para la limpieza eficaz y barata de ciertos contaminantes, por ello es considerada una tecnología alternativa y sustentable (Delgadillo *et al.*, 2011).

Ciertas plantas son usadas para la fitorremediación por que presentan características de tolerancia, tipo de suelo y adaptabilidad a contaminantes como los metales pesados. Por otra parte, hay especies que necesitan del tipo del suelo adecuado y pH óptimo para que puedan crecer y poder absorber el contaminante y luego degradarlo. Al no contar con estas condiciones nace la posibilidad de que se pueda adaptar a la planta al tipo de contaminante que existe en el medio. Así se han encontrado especies que tienen la capacidad de hiperacumular diferentes contaminantes (Agudelo *et al.*, 2005). En algunos casos la fitorremediación es más lenta que en los procesos fisicoquímicos, en consecuencia, la remediación será un proceso a largo plazo (Cunningham *et al.*, 1995).

Según McGrath y Zhao (2003), las plantas hiperacumuladoras son aquellas que tienen una alta concentración de metales pesados en la parte aérea de su biomasa, es así que su concentración de metal respecto del suelo es mayor a 1, por lo tanto, puede llegar a alcanzar niveles altos. Por lo cual, la sensibilidad de las especies vegetales a los metales pesados varía, siendo las plantas vasculares las que toleran más, estos pueden ser atribuidos por factores fisiológicos y genéticos (Castro, 2013).

Existen especies de plantas (cultivos) que tienen la capacidad de fitorremediar suelos contaminados con metales pesados y hasta remover materiales peligrosos, tal es el caso del *Helianthus annuus* L. “girasol”, el *Zea mays* L. “maíz”, el *Lycopersicum* sp “tomate” y el *Pelargonium* sp “geranio” (Kaemmerer, 2003).

1.2.2. Mecanismos de la fitorremediación

Los mecanismos que emplea la fitorremediación (Figura 1) para poder remover y degradar los contaminantes son los siguientes:

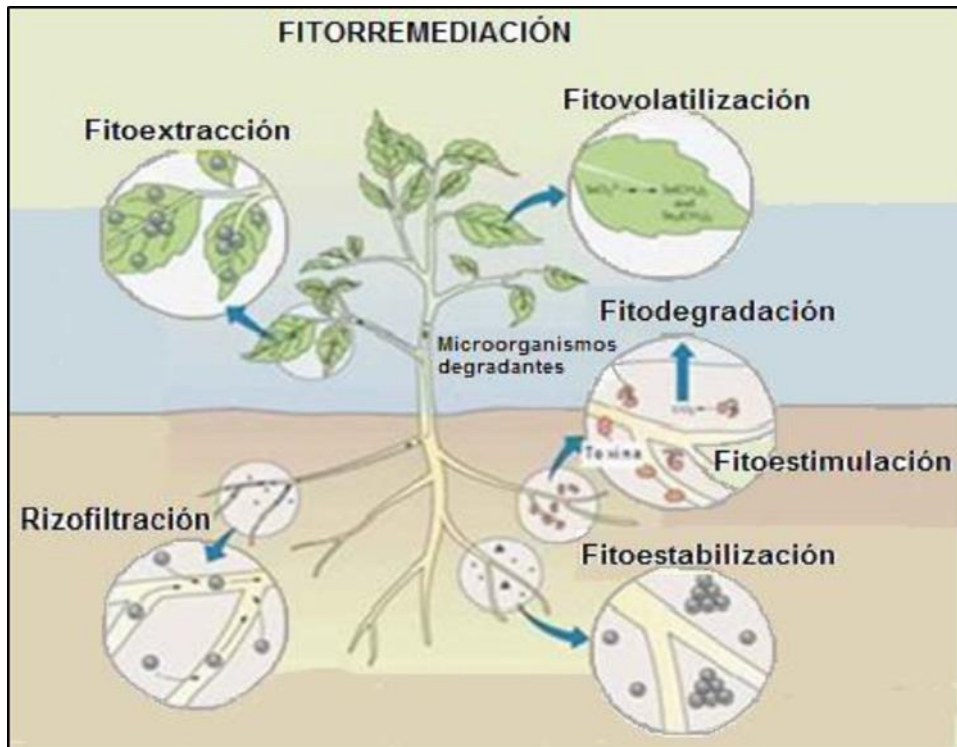
- a. **Fitoextracción:** Este proceso de acción, que tiene por finalidad el empleo de un mecanismo llamado absorción, que consiste en el empleo de las raíces y el tallo para la absorción de contaminantes tóxicos o compuestos orgánicos. Las plantas usadas para este mecanismo deben ser consideradas por el tamaño de sus raíces, su tasa de crecimiento y su biomasa. Se conoce que los musgos, helechos y los pastos son los

que mejor se adaptan ambientalmente por que pueden captar y absorber grandes cantidades de contaminantes (Volke *et al.*, 2005).

- b. **Fitoestabilización:** Consiste en el uso de plantas que ayudan a la reducción de la biodisponibilidad y movilidad de contaminantes, este mecanismo de la fitorremediación evita que el contaminante sea esparcido en el entorno, así como también en la atmósfera, llegando a mejorar ciertas propiedades tanto físicas como químicas del entorno (Diez, 2008).
- c. **Fitoimmobilización:** Es un mecanismo en donde se emplean las raíces de plantas como parte de la fijación y de la inmovilización de contaminantes que se encuentran presentes en el suelo (Carpena y Bernal, 2007).
- d. **Fitovolatilización:** Mecanismo que permite eliminar contaminantes del aire (contaminantes orgánicos volátiles), mediante la volatilización, su funcionamiento se da cuando las plantas en crecimiento empiezan a absorber agua. Muchos de los contaminantes que llegan hasta las hojas de la planta, son liberados a la atmósfera (Krämer, 2005).
- e. **Fitodegradación:** En este proceso se da la interacción y asociación de plantas y microorganismos con la finalidad de degradar a moléculas más simples y pequeñas, estas moléculas le permiten a la planta poder aumentar y acelerar su crecimiento (López *et al.*, 2005).
- f. **Rizofiltración:** Se emplean en las raíces como proceso principal de la absorción de contaminantes presentes en el agua, una de sus características es que considera a las plantas con mayor cantidad de raíces y que tengan una mayor tasa de crecimiento que le permita absorber y concentrar los contaminantes como metales pesados (Cunningham y Berti, 1993).
- g. **Fitoestimulación:** Consiste en la estimulación radicular que permite el crecimiento de microorganismos (bacterias y hongos) que ayudan a degradar compuestos orgánicos (Núñez *et al.*, 2004).

Figura 1

Mecanismos de la fitorremediación



Nota. Elaborado por Baird (2004).

1.2.3. Morfología *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi”

Según Tapia (2015) el Tarwi es una planta de la familia de la Fabaceae de crecimiento erecto, considerado como un cultivo andino muy nutritivo cuya morfología está compuesta por las siguientes partes:

- a. **Raíz:** La raíz es vigorosa, leñosa y poco profunda, desempeña un rol de sostén para la planta y se encarga de la conducción de la savia desde el suelo hasta los demás órganos. Posee alta cantidad de nódulos y pelos radicales con bacterias llamadas *Rhizobium spp.*, que pueden fijar nitrógeno.
- b. **Tallo:** Es la parte aérea, generalmente muy leñosa que está formado por un tallo único cuya forma puede ser cilíndrica o aplanada, dentro de su estructura puede tener un tallo con poca o mucha ramificación.

- c. **Hoja:** En su mayoría son hojas alargadas y presentan folíolos que pueden variar de acuerdo al tamaño. En cuanto al color de los pecíolos, estos pueden variar de amarillo verdoso a verde oscuro.
- d. **La flor o inflorescencia:** La inflorescencia es una porción terminal compuesta de flores, cada flor mide aproximadamente 1,2 cm de longitud, conformada por la corola con cinco pétalos, uno el estandarte, dos la quilla y dos las alas, donde se pueden apreciar que los colores de pétalo pueden variar de blanco, azul, crema y púrpura.
- e. **El fruto:** El fruto es una vaina de forma elíptica, de tamaño variable esto debido a su variedad. Tienen cierto tamaño que puede variar (4-15 mm) de acuerdo a la calidad y al cuidado que se le da al cultivo, por lo que la forma del fruto es redondeada.

1.2.4. Morfología *Vicia faba* L. “haba”

El cultivo de haba es una planta anual con raíces profundas que cumple un ciclo de vida de 6 a 12 meses y presenta una morfología compleja (Guerra, 2014):

- a. **Tallos:** Presenta una coloración verde, son fuertes y ramificados, con una altura incluso de 1,5 m. Según su variedad y especie, los tallos serán diferentes entre sí.
- b. **Hojas:** Se caracterizan por ser verdes, presentan formas alargadas y ovaladas aproximadamente redondas.
- c. **Flores:** Se originan en las axilares de las hojas, se agrupa en racimos de 2 a 8 flores de colores violeta y presenta unas manchas que pueden variar en tamaño.
- d. **Fruto:** De acuerdo a su variedad pueden medir incluso 35 cm, cada vaina puede oscilar entre los 2 y 9 granos. Las semillas poseen un color verde amarillento, aunque pueden presentar coloraciones más oscuras.

1.2.5. Suelos contaminados

Los suelos contaminados presentan unas características anómalas, con una disminución y desequilibrio en cuanto a su contenido de nutrientes, presentando una baja retención de agua y la presencia de contaminantes tóxicos (Puga *et al.*, 2006).

Existen diferentes tecnologías y procesos (físicos, químicos y biológicos) que se usan para descontaminar suelos, las cuales pueden ser clasificadas en tres categorías según a su aplicación: (a) *in situ* (en el sitio o lugar contaminado sin mover el suelo), (b) *on site* (en el sitio o lugar, pero moviendo el suelo), y (c) *ex situ* (en otro lugar distinto al que se encuentra el suelo contaminado, donde hay movimiento y transporte de tierras) (Moreno, 2010).

1.2.6. Metales pesados

De acuerdo a sus características y a su alta densidad, son compuestos tóxicos para el ambiente. Los contaminantes como los metales pesados tienen la capacidad de provocar cambios evolutivos debido a sus efectos dañinos en plantas (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2012).

Plomo

El plomo (Pb) es un metal pesado de color gris, blando y maleable que se caracteriza por ser tóxico tanto para el hombre como el medio ambiente. Su presencia en el ambiente es de manera natural, pero la contaminación por plomo en el ambiente es de tipo antropogénico porque en su mayoría son productos de la minería, aunque también están presentes en las industrias y en las refinerías. En la actualidad el Pb es el contaminante de mayor relevancia debido a la toxicidad que este presenta (Rodríguez *et al.*, 2006).

El plomo es un metal pesado ubicuo que se encuentra en el ambiente urbano como rural, siendo los ambientes laborales donde hay una mayor exposición, sin dejar de lado las exposiciones alimentarias y domésticas que son un gran problema para la salud pública. (Ramírez, 2005, p. 58)

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

La presente investigación presentó un diseño experimental porque se manipulo la variable independiente conformada por los niveles de plomo; a su vez, presento un enfoque cuantitativo porque abordó un conjunto de procesos en donde se recolectó datos para probar la hipótesis. El alcance de la investigación es explicativo porque se evalúa la causa del efecto estudiado (Hernández *et al.*, 2010).

2.2. Lugar y fecha

La investigación fue realizada en dos etapas: Para la siembra fue utilizado el invernáculo y para el análisis, el laboratorio de la UCSS (Universidad Católica Sedes Sapientiae), el tiempo de la investigación fue seis meses, septiembre 2018 hasta febrero 2019.

2.3. Descripción del experimento

Selección y germinación de semillas

Las semillas de “tarwi” y “haba” son procedentes de la Estación Experimental Agraria Santa Ana-Huancayo, el “tarwi” pertenece a la variedad H6 que se caracteriza por poseer un buen rendimiento, asimismo la germinación ocurre entre 15 a 20 días después de la siembra según lo indicado por Tapia (2015). Por el contrario, el “haba” es de la variedad INIA 429-Fortaleza, por tanto, su germinación se produce de 8 a 12 días después de la siembra. Se seleccionó las semillas que estaban en buen estado (que no presenten orificios) tal como se muestra en la (Figura 2).

Figura 2

Selección de semillas en buen estado



Nota. A: Haba, B: Tarwi. Elaboración propia.

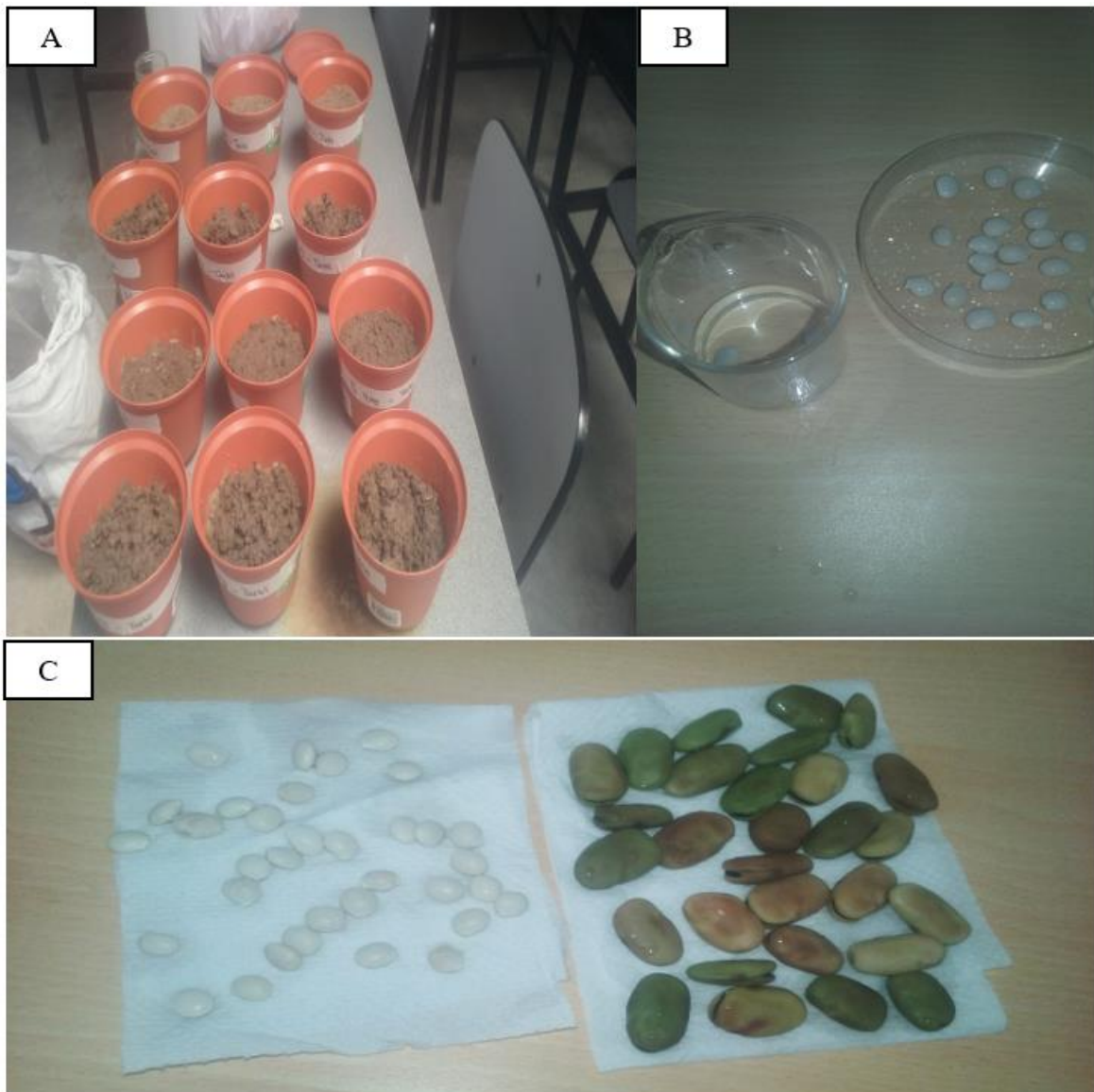
Preparación del suelo contaminado con sales de plomo

a. Sustrato preparado

El sustrato fue adquirido como suelo preparado (SODIMAC HOMECENTER ®) y presenta la siguiente composición textural: 46 % de arena, 20 % de arcilla y 34 % de limo, considerándose un suelo franco, según lo indicado por Paiva (2015). A continuación, se colocó el sustrato en macetas de plástico de capacidad de 250 g. Posteriormente se incorporó dos semillas debidamente desinfectadas con hipoclorito de sodio al 1,0 % tal como se observa en la Figura 3. El hipoclorito de sodio es utilizado como desinfectante en frutas y hortalizas, que requieren la eliminación de agentes patógenos como hongos, bacterias y microorganismos perjudiciales (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria [OIRSA], 2020).

Figura 3

Preparación del sustrato y desinfección de semillas



Nota. A: Colocación del sustrato en maceteros, B: Desinfección de semillas con hipoclorito de sodio a 1.0 %, C: Semillas esterilizadas. Elaboración propia.

b. Preparación de solución con sales de plomo y solución nutritiva

En esta etapa se preparó el contaminante que estuvo constituido por nitrato de plomo (2, 4, 8 y 16 g) las cuales fueron diluidas en 1 L de agua destilada y conservadas a 4 °C hasta su uso. Para la solución nutritiva que fue agregada para estimular el crecimiento de las raíces, fue preparada a partir de una solución NPK, de relación nutricional 1:3:1 (100, 300 y 100 g/L), que se caracteriza por ser una fuente de nitrógeno, fósforo y potasio, enriquecido con magnesio y azufre. (Soluciones Nutritivas [SN], 2016). Para la preparación de la solución

nutritiva se siguió la metodología de Solución hidropónica La Molina (Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM], 2003), utilizándose 5 mL de la solución A y 2 mL de solución B, para 1 L de agua destilada (Figura 4).

Figura 4

Preparación de soluciones



Nota. A: Pesaje del nitrato de plomo, B: Dilución de nitrato de plomo, C: Recipientes con la solución de nitrato de plomo y D: Preparación de solución nutritiva.

2.4. Tratamientos

Los tratamientos empleados en la investigación, tanto para *Lupinus mutabilis* “tarwi” como para *Vicia faba* “haba” se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1

Tratamientos del experimento

| Tratamiento | Réplicas | Dosis |
|--------------------|-----------------|--|
| T0 | Control (3) | Suelo + Solución nutritiva |
| T1 | 3 | 2 mg Pb(NO ₃) ₂ (suelo) + Solución nutritiva |
| T2 | 3 | 4 mg Pb(NO ₃) ₂ (suelo) + Solución nutritiva |
| T3 | 3 | 8 mg Pb(NO ₃) ₂ (suelo) + Solución nutritiva |
| T4 | 3 | 16 mg Pb(NO ₃) ₂ (suelo) + Solución nutritiva |

Nota. Las concentraciones de plomo fueron propuestas a partir de la investigación de Maguiña (2017).
Elaboración propia.

En relación a los tratamientos experimentales indicados (T0) representa al control, mientras (T1, T2, T3 y T4) representan a los tratamientos con 3 réplicas por cada tratamiento con sus respectivas dosis, las cuales son T1 (2 mg Pb(NO₃)₂), T2 (4 mg Pb(NO₃)₂), T3 (8 mg Pb(NO₃)₂) y T4 (16 mg Pb(NO₃)₂) todos incluidos en el suelo (tierra de chacra).

2.5. Unidades experimentales

En la investigación se consideraron 24 unidades experimentales más su control, haciendo un total de 30 unidades experimentales; los cuales consistieron en cuatro tratamientos para “tarwi”, cuatro tratamientos para “haba” y tres repeticiones por tratamiento.

2.6. Identificación de variables y su mensuración

Las variables analizadas para esta investigación se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2*Variables y su mensuración*

| Variable | Unidades | Método |
|-------------------------|-----------------|---------------|
| pH | Unidades de pH | pH metro |
| Remoción de plomo | mg/L | Fotometría |
| Fósforo total | mg/L | Fotometría |
| Índice de supervivencia | Adimensional | Fórmula |
| Factor de traslocación | Adimensional | Fórmula |

Medición de potencial de hidrógeno (pH) en los tratamientos

La medición se llevó a cabo con la ayuda de un pH-metro digital marca Hanna modelo HI 98103. Para la calibración del equipo se utilizó las soluciones buffer de pH 4 y pH 7. Para realizar la medición, primero se extrajo 1 g de suelo de cada tratamiento, luego se añadió 10 mL de agua desionizada en un vaso descartable, se mezcló, se dejó reposar por 3 minutos, para después insertar el pH-metro y registrar los valores en un intervalo de 10 segundos para verificar si ocurre alguna variación de los valores, todo el procedimiento se realizó en la etapa inicial de la preparación del sustrato. Por último, se hizo la limpieza del sensor con agua destilada después de cada medición (Fernández *et al.*, 2006).

Medición de la remoción de plomo

En el caso de la remoción, se analizó la concentración de plomo en el suelo, se tomó 4 mL de la muestra a la que se le adicionó 0,50 mL del reactivo Pb-1 y 0,50 mL de Pb-2, por último, se le añadió 4 mL de agua destilada, se agitó y se llevó a medir con el equipo espectrofotométrico WTW pHotoFlex ® (Figura 5) siguiendo las recomendaciones del fabricante. Para el cálculo de la remoción de plomo, Apaza (2015) utilizó la fórmula siguiente:

$$\%R = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100$$

Donde:

%R: Porcentaje de remoción

Ci: Concentración inicial

Cf: Concentración final

Figura 5

Fotómetro WTW pHotoFlex y reactivos para análisis de plomo

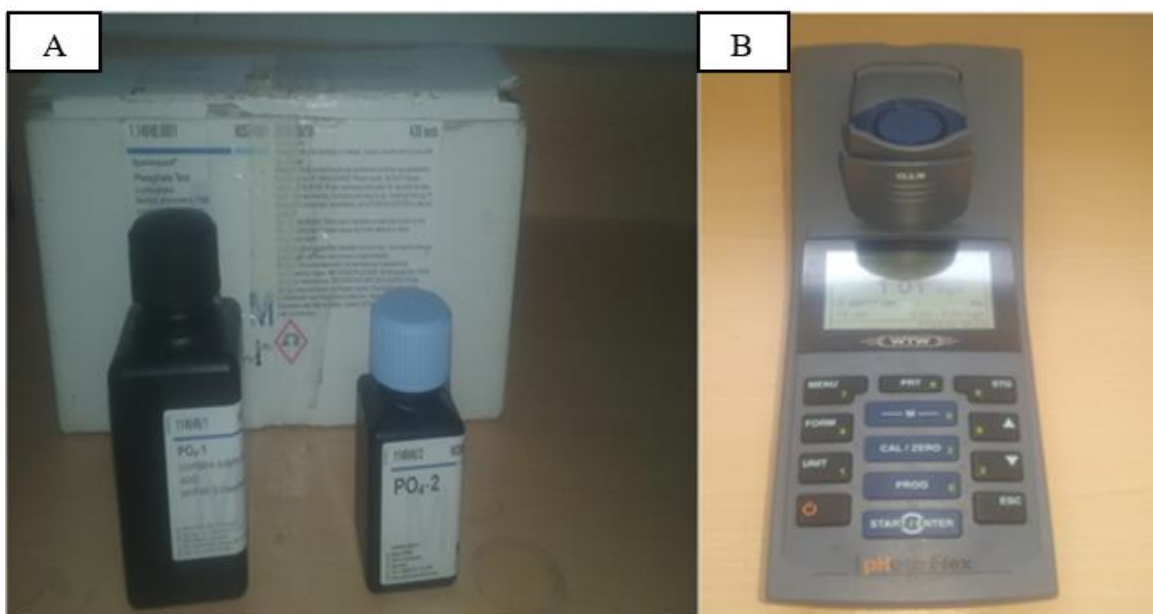


Medición de fósforo total

Para el análisis de fósforo total se tomó 5 mL de muestra en una cubeta de reacción, a la que se le añadió cinco gotas del reactivo PO4-1 y una microcuchara del reactivo PO4-2, se agitó hasta que el reactivo se haya disuelto, se dejó reposar por cinco minutos para luego ser introducido y medido con el equipo espectrofotométrico WTW pHotoFlex®. (Figura 6).

Figura 6

Medición de fósforo



Nota. A: Reactivos para análisis de fósforo, B: Fotómetro WTW pHotoFlex.

Índice de supervivencia

Para determinar el índice de supervivencia se siguió el procedimiento expuesto por Maguiña (2017), el cual se calcula dividiendo el número de plantas vivas en un determinado tiempo entre el número de plantas iniciales. En la presente investigación se consideró un tiempo de 60 días de exposición a los tratamientos T0, T1, T2, T3 y T4, para luego contabilizar el número de plantas en cada maceta y proceder a calcular el índice de supervivencia a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de supervivencia} = \frac{\text{Número de plantas vivas en un tiempo determinado}}{\text{Número de plantas iniciales}}$$

Factor de traslocación (FT)

En esta etapa se cortó parte del tallo y raíz de “haba” y “tarwi” de cada tratamiento, se llevó a secar en un horno a una temperatura de 110 °C por 3 horas, se pesó 10 g del material seco y se le añadió ácido nítrico (HNO₃), luego se tomó 1 mL de la muestra en una cubeta y se añadió 9 mL de agua destilada, por último, se llevó a analizar en el fotómetro WTW pHotoFlex® (Figura 7). A partir de los datos obtenidos se analizó el factor de traslocación, el cual

indica la relación que hay entre la concentración de un metal acumulada en la parte aérea y la raíz de la planta, la cual se calcula de la siguiente manera (Hazrat *et al.*, 2013).

$$FT = \frac{\text{Concentración de Pb en tallo}}{\text{Concentración de Pb en raíz}}$$

Figura 7

Etapas para el cálculo del factor de traslocación



Nota. A: Corte de tallo y raíz de haba y tarwi, B: Secado en horno de tallo y la raíz, C: Muestras de tallo y raíz con HNO₃, D: Lectura de la muestra mediante fotómetro.

2.7. Diseño estadístico del experimento

Se planteó un diseño completamente aleatorio (DCA) con arreglo factorial de 2 x 4 x 3 + control; siendo un total de 24 tratamientos más el control, fue tomado como factores a las dos especies de “tarwi” y “haba”, cuatro dosis diferentes, tres repeticiones y su control, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Arreglo factorial

| Especies de plantas | Niveles de contaminante en el suelo | | | |
|---------------------|-------------------------------------|----|----|----|
| | T1 | T2 | T3 | T4 |
| Tarwi | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Haba | 3 | 3 | 3 | 3 |

2.8. Análisis estadístico de datos

Para el registro de datos fue utilizado el programa Excel versión 2016. El análisis estadístico se realizó utilizando el programa SPSS versión 21. Luego se efectuó el análisis de varianza ANOVA ($p \leq 0,05$) para cada variable experimental, así mismo se hizo la comparación de medias usando el test de Tukey. Finalmente, para la realización de las gráficas se utilizó el programa ESTADÍSTICA.

2.9. Materiales

2.9.1. Material biológico

- Semillas de *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” y *Vicia faba* L. “haba” adquiridas en la ciudad de Huancayo

2.9.2. Materiales para el crecimiento de la planta

- Tierra de chacra adquirida en SODIMAC HOMECENTER ®

- Macetas (10,2 cm de diámetro x 8,2 cm de alto) adquirida en SODIMAC HOMECENTER ®
- Soluciones hidropónicas (solución A: 250 mL y solución B: 100 mL) adquiridas de la empresa Red de Multiservicios Regionales SAC

2.9.3. Materiales de laboratorio

- Placas Petri
- Nitrato de plomo (50 g)
- 4 recipientes de vidrio
- Hipoclorito de sodio (al 1,0 %)
- Pipetas de plástico (de 1 mL)
- Una probeta de 1 L
- Una micropipeta
- Ácido nítrico
- Kit de fósforo
- Kit de plomo

2.9.4. Equipos

- Fotómetro WTW pHotoFlex ®
- pH metro digital marca Hanna HI 98103
- Balanza digital marca Electronic Balance
- Horno tostador IMACO HE900

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Resultados de índice de supervivencia de “haba” y “tarwi”

La Tabla 4 y la Figura 8, muestran los valores promedio del índice de supervivencia para el cultivo de *Vicia faba* L. “haba” y *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” para los tratamientos y su control. El tratamiento control para el cultivo de “haba” registró un valor promedio de $0,91 \pm 0,10$ con respecto al índice de supervivencia. El valor promedio más alto se obtuvo en T3 ($1,02 \pm 0,08$) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T1 ($0,66 \pm 0,04$).

Para el cultivo de “tarwi”, el tratamiento control registró un valor promedio de $0,95 \pm 0,05$ con respecto al índice de supervivencia. El valor promedio más alto se obtuvo en T3 ($0,83 \pm 0,17$) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T2 ($0,5 \pm 0,3$).

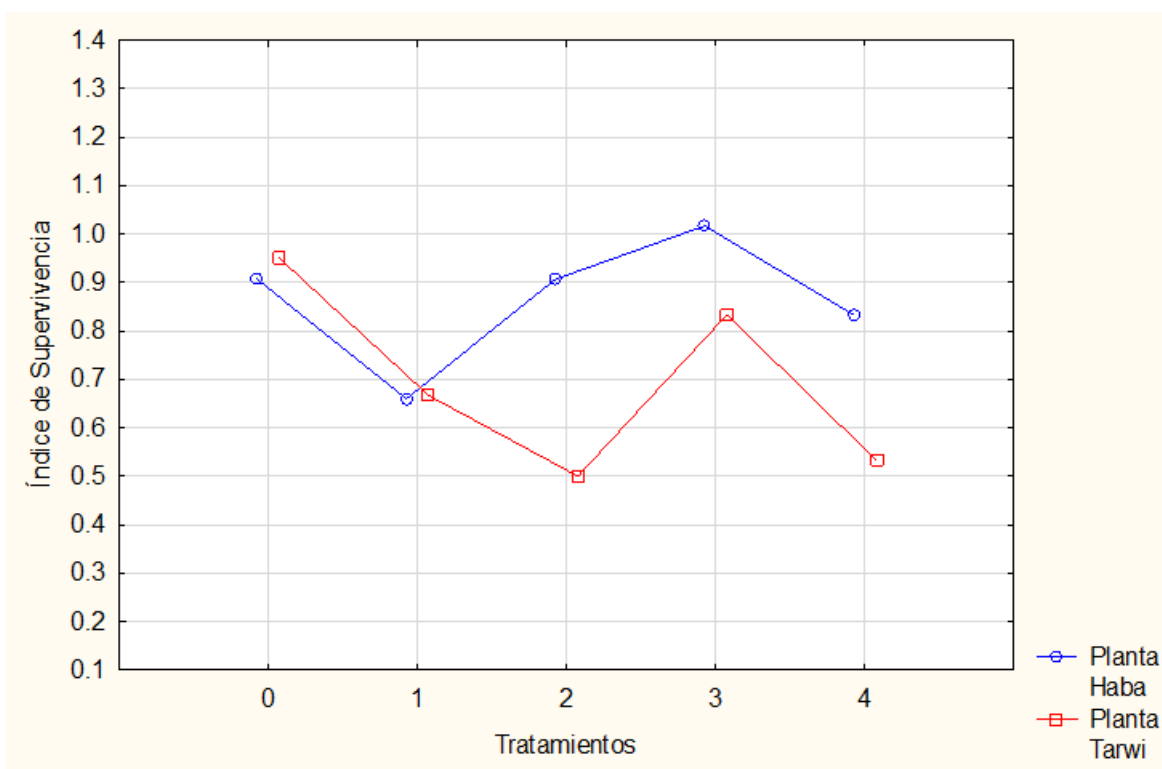
Los resultados del análisis de varianza muestran que el cultivo de “haba” presenta una diferencia significativa ($p < 0,05$), en relación al índice de supervivencia frente a todos los tratamientos (ver Apéndice 1). Por el contrario, el cultivo de “tarwi” no presenta diferencia significativa ($p > 0,05$) (ver Apéndice 2). En la investigación se observa que los resultados del índice de supervivencia para el cultivo de “haba” fueron diferentes a los resultados para el cultivo de “tarwi”. El análisis de Tukey para “haba” muestra que las medias de los tratamientos T1 y T3 son diferentes en índice de supervivencia, por lo tanto, si presentan diferencia significativa (ver Apéndice 3). Por otro lado, el análisis de Tukey para “tarwi” muestra que las medias de los tratamientos T1, T2, T3, T4 y Control presentan similar índice de supervivencia (no presentan diferencia significativa) (ver Apéndice 10).

Tabla 4*Resultados del índice de supervivencia en el cultivo de “haba” y “tarwi” (promedio±DS)*

| Tratamiento | Índice de supervivencia haba | Índice de supervivencia tarwi |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| Control | 1,0 | 1,0 |
| | 0,80 | 0,95 |
| | 0,92 | 0,90 |
| | 0,91 ± 0,10 | 0,95 ± 0,05 |
| T1 | 0,66 | 0,66 |
| | 0,62 | 0,7 |
| | 0,70 | 0,64 |
| | 0,66 ± 0,04 | 0,67 ± 0,03 |
| T2 | 1,0 | 0,5 |
| | 0,92 | 0,2 |
| | 0,80 | 0,8 |
| | 0,91 ± 0,10 | 0,5 ± 0,3 |
| T3 | 1,0 | 0,83 |
| | 0,95 | 1,0 |
| | 1,1 | 0,67 |
| | 1,02 ± 0,08 | 0,83 ± 0,17 |
| T4 | 0,83 | 0,5 |
| | 0,67 | 0,9 |
| | 1,0 | 0,2 |
| | 0,83 ± 0,17 | 0,53 ± 0,35 |

Figura 8

Gráfico del índice de supervivencia para el cultivo de “haba” y “tarwi” con sus distintos tratamientos y control



3.2. Resultados de la variación de potencial de hidrógeno (pH) en el suelo para los distintos tratamientos

La Tabla 5 y Figura 9, muestra los valores promedio y la variación de potencial de hidrógeno (pH) en suelo, en los cultivos de “haba” y “tarwi”, el tratamiento control para el cultivo de “haba” registró el valor promedio de potencial de hidrógeno de $7,0 \pm 0,1$. El valor promedio más alto lo obtuvo el T4 ($8,5 \pm 0,06$) y el valor promedio más bajo fue el T1 ($7,7 \pm 0,15$).

El tratamiento control para el cultivo de “tarwi” registró un valor promedio de potencial de hidrógeno de $7,0 \pm 0,3$, mientras que los valores promedio más altos estuvieron en T2 ($8,6 \pm 0,15$), T3 ($8,6 \pm 0,1$) y T4 ($8,6 \pm 0,06$), el valor promedio más bajo se obtuvo en T1 ($8,5 \pm 0,06$).

Los resultados del análisis de varianza muestran que el cultivo de “haba” y “tarwi” presenta una diferencia significativa ($p < 0,05$) en relación del potencial de hidrógeno frente a todos

los tratamientos (ver Apéndice 1) y (ver Apéndice 2). El análisis de Tukey del potencial de hidrógeno para el cultivo de “haba” muestra que las medias de los tratamientos T1, T2, T4 y Control presentan potencial de hidrógeno diferente, por lo tanto, si presentan diferencia significativa (ver Apéndice 4), mientras que para el cultivo de “tarwi” se mostraron que las medias de los tratamientos T1 y Control tuvieron un potencial de hidrógeno diferente por lo que también presentan diferencia significativa. (ver Apéndice 11).

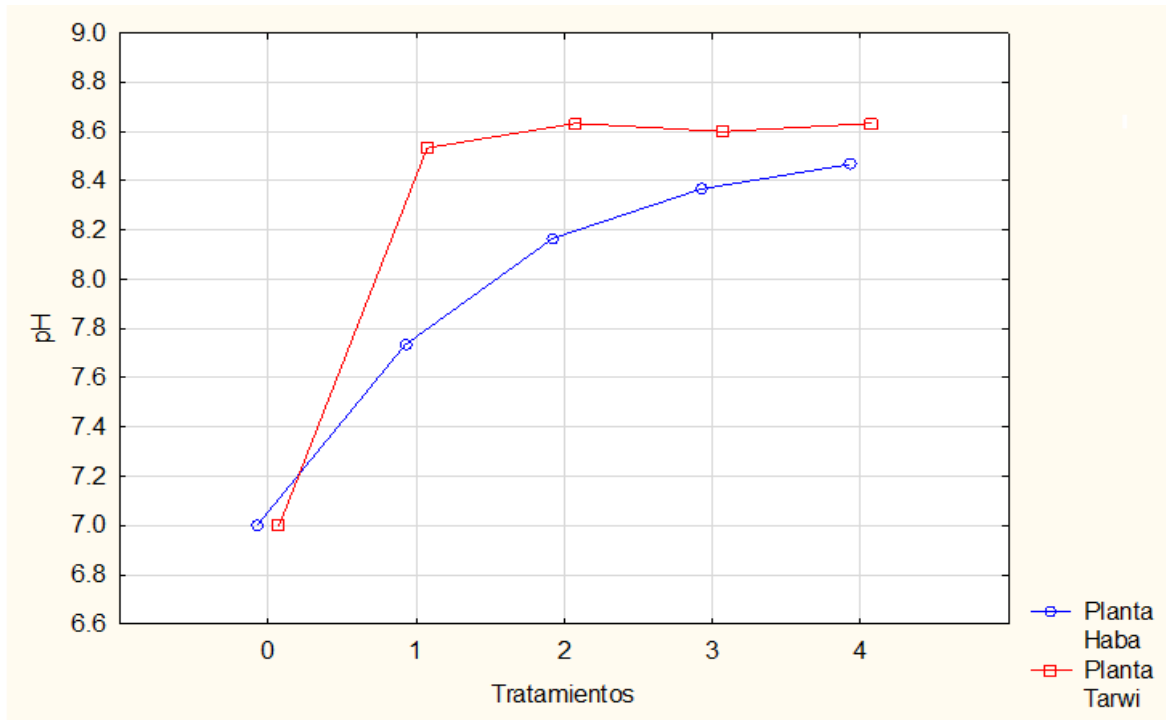
Tabla 5

Potencial de hidrógeno (pH) para el cultivo de “haba” y “tarwi” (promedio±DS)

| Tratamiento | pH haba | pH tarwi |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| Control | 7,0 | 7,0 |
| | 7,1 | 6,7 |
| | 6,9 | 7,3 |
| | 7,0 ± 0,1 | 7,0 ± 0,3 |
| T1 | 7,6 | 8,6 |
| | 7,7 | 8,5 |
| | 7,9 | 8,5 |
| | 7,7 ± 0,15 | 8,5 ± 0,06 |
| T2 | 8,1 | 8,5 |
| | 8,2 | 8,8 |
| | 8,2 | 8,6 |
| | 8,2 ± 0,06 | 8,6 ± 0,15 |
| T3 | 8,3 | 8,5 |
| | 8,3 | 8,6 |
| | 8,5 | 8,7 |
| | 8,4 ± 0,12 | 8,6 ± 0,1 |
| T4 | 8,5 | 8,6 |
| | 8,4 | 8,7 |
| | 8,5 | 8,6 |
| | 8,5 ± 0,06 | 8,6 ± 0,06 |

Figura 9

Gráfico de la variación de potencial de hidrógeno (pH) de “haba” y “tarwi” para los distintos tratamientos y control



3.3. Resultados de la concentración de plomo en los cultivos de “haba” y “tarwi”

Valores promedio de la concentración de plomo en el cultivo con “haba” a nivel de suelo, tallo y raíz en los cuatros tratamientos y su control

La Tabla 6 muestra los valores promedio de la concentración de plomo en el cultivo con “haba” en suelo, tallo y raíz para los tratamientos y su control. El tratamiento control para el cultivo de “haba”, en suelo registró el valor promedio de $4,95 \pm 0,15$ mg/L. La mayor concentración de plomo en el suelo estuvo en T1 ($5,94 \pm 0,06$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T3 ($3,34 \pm 0,15$ mg/L).

El tratamiento control para el cultivo con “haba”, registró un valor promedio en el tallo de $0,91 \pm 0,10$ mg/L. El valor promedio de plomo más alto en el tallo se obtuvo en T4 ($1,70 \pm 0,10$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T1 ($1,15 \pm 0,05$ mg/L). El tratamiento control para el cultivo de “haba”, en raíz registró el valor promedio de $2,92 \pm 0,08$ mg/L. El

valor promedio de plomo más alto en la raíz se obtuvo en T1 ($2,94 \pm 0,13$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T2 ($2,36 \pm 0,06$ mg/L).

Los resultados del análisis de varianza muestran que el cultivo con “haba” presenta una diferencia significativa ($p < 0,05$), en relación de la concentración de plomo en suelo, tallo y raíz frente a todos los tratamientos (ver Apéndice 1). El análisis de Tukey para el cultivo con “haba” en suelo, tallo y raíz muestra que las medias de los tratamientos T2, T3 y T4 presentan similares concentraciones (no presentan diferencia significativa) a diferencia de las medias del tratamiento T1 y Control que son diferentes, lo que significa que presentan diferencia significativa en la concentración de plomo en el suelo (ver Apéndice 5). Por otra parte, los tratamientos T1, T2 y T3 presentaron baja acumulación de plomo en el tallo, mientras que en el tratamiento T4 hay una mayor acumulación del metal en tallo (ver Apéndice 6). Por último, los tratamientos T2 y T3 presentaron bajas cantidades de plomo en la raíz en tanto el T1, T4 y Control presentaron similares y altas concentraciones de plomo para la raíz (ver Apéndice 7).

Tabla 6

Valores promedio de la concentración del plomo (mg/L) en el cultivo con “haba” a nivel de suelo, tallo y raíz en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)

| Tratamiento | Suelo | Tallo | Raíz |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Control | 4,95 | 0,92 | 2,92 |
| | 4,80 | 0,80 | 2,84 |
| | 5,10 | 1,00 | 3,00 |
| | 4,95 ± 0,15 | 0,91 ± 0,10 | 2,92 ± 0,08 |
| T1 | 5,91 | 1,14 | 2,97 |
| | 5,90 | 1,20 | 2,84 |
| | 6,00 | 1,10 | 3,10 |
| | 5,94 ± 0,06 | 1,15 ± 0,05 | 2,94 ± 0,13 |
| T2 | 3,68 | 1,18 | 2,36 |
| | 3,50 | 1,15 | 2,30 |
| | 3,80 | 1,20 | 2,42 |
| | 3,66 ± 0,15 | 1,18 ± 0,03 | 2,36 ± 0,06 |
| T3 | 3,32 | 1,33 | 2,47 |
| | 3,20 | 1,40 | 2,50 |
| | 3,50 | 1,25 | 2,45 |
| | 3,34 ± 0,15 | 1,33 ± 0,08 | 2,47 ± 0,03 |
| T4 | 3,35 | 1,70 | 2,93 |
| | 3,70 | 1,80 | 2,70 |
| | 3,10 | 1,60 | 3,15 |
| | 3,38 ± 0,30 | 1,70 ± 0,10 | 2,93 ± 0,23 |

Valores promedio de la concentración de plomo en el cultivo con “tarwi” a nivel de suelo, tallo y raíz en los cuatro tratamientos y su control

La Tabla 7 muestra los valores promedio de la concentración de plomo para el cultivo con “tarwi” en suelo, tallo y raíz para los tratamientos y su control. El tratamiento control para el cultivo con “tarwi”, en suelo registró el valor promedio de $7,46 \pm 0,14$ mg/L. El valor promedio más alto en el suelo estuvo en el T3 ($6,83 \pm 0,17$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T1 ($4,60 \pm 0,15$ mg/L). El tratamiento control para el cultivo con “tarwi”

en el tallo registró un valor promedio de $0,84 \pm 0,16$ mg/L. El valor promedio más alto en el tallo se obtuvo en T3 ($0,89 \pm 0,07$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T4 ($0,75 \pm 0,05$ mg/L). El tratamiento control para el cultivo con “tarwi” en raíz registró un valor promedio de $1,01 \pm 0,02$ mg/L. El valor promedio más alto en la raíz se obtuvo en T2 ($0,95 \pm 0,05$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T3 ($0,78 \pm 0,04$ mg/L).

Los resultados del análisis de varianza muestran que el cultivo con “tarwi” presenta una diferencia significativa ($p < 0,05$), en relación de la concentración de plomo en suelo y raíz frente a todos los tratamientos. Por el contrario, el tallo no presentó diferencia significativa ($p > 0,05$) (ver Apéndice 2). El análisis de Tukey para el cultivo con “tarwi” en suelo, tallo y raíz, muestra que las medias de los tratamientos T1 y T4 fueron las más bajas de plomo en el suelo (no presentan diferencia significativa), mientras que los tratamientos T2, T3 y Control sí presentan diferencia significativa (ver Apéndice 12). En tanto las medias de los tratamientos T1, T2, T3, T4 y Control presentaron similar acumulación de plomo en el tallo (no presentan diferencia significativa) (ver Apéndice 13). Por último, en las medias de los tratamientos T1, T2, T3 y T4 se encontró similar cantidad de plomo en la raíz (no hay diferencia significativa), mientras que en el Control hubo una mayor concentración de plomo en raíz, sí presentó diferencia significativa (ver Apéndice 14).

La Figura 10 demostró que el cultivo con “haba” tuvo una mayor concentración de plomo en el tratamiento T1 y una menor concentración en el tratamiento T3 con relación a los análisis de suelo. En tallo hubo una mayor concentración de plomo en el tratamiento T4 y una menor concentración en el tratamiento T1. Por último, en la raíz hay una mayor concentración de plomo en el tratamiento T1 y una menor concentración en el tratamiento T2.

En relación a los análisis de suelo, el cultivo con “tarwi” obtuvo una mayor concentración de plomo en el tratamiento T3 y una menor concentración en el tratamiento T1. Así mismo, en el tallo hay una mayor concentración de plomo en el tratamiento T3 y una menor concentración en el tratamiento T4. Por último, en la raíz hubo una mayor concentración de plomo en el tratamiento T2 y una menor concentración en el tratamiento T3.

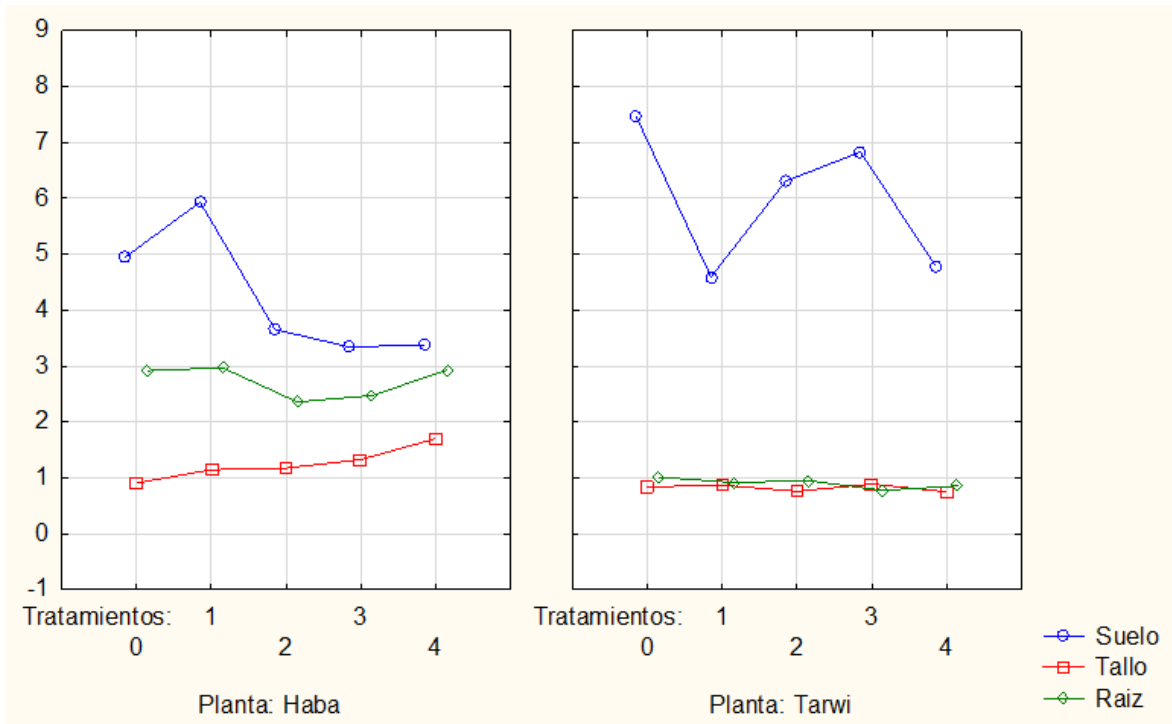
Tabla 7

Valores promedio de la concentración de plomo (mg/L) en el cultivo con “tarwi” a nivel de suelo, tallo y raíz en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)

| Tratamiento | Suelo | Tallo | Raíz |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Control | 7,46 | 0,84 | 1,01 |
| | 7,32 | 1,00 | 1,03 |
| | 7,60 | 0,68 | 1,00 |
| | 7,46 ± 0,14 | 0,84 ± 0,16 | 1,01 ± 0,02 |
| T1 | 4,59 | 0,87 | 0,92 |
| | 4,45 | 0,94 | 0,84 |
| | 4,75 | 0,80 | 1,00 |
| | 4,60 ± 0,15 | 0,87 ± 0,07 | 0,92 ± 0,08 |
| T2 | 6,31 | 0,76 | 0,95 |
| | 6,20 | 0,86 | 1,00 |
| | 6,42 | 0,66 | 0,90 |
| | 6,31 ± 0,11 | 0,76 ± 0,1 | 0,95 ± 0,05 |
| T3 | 6,83 | 0,89 | 0,78 |
| | 6,66 | 0,82 | 0,81 |
| | 7,00 | 0,96 | 0,74 |
| | 6,83 ± 0,17 | 0,89 ± 0,07 | 0,78 ± 0,04 |
| T4 | 4,80 | 0,75 | 0,86 |
| | 5,00 | 0,80 | 0,71 |
| | 4,60 | 0,70 | 1,00 |
| | 4,80 ± 0,2 | 0,75 ± 0,05 | 0,86 ± 0,15 |

Figura 10

Comparación de la concentración de plomo para el cultivo de “haba” y “tarwi” en suelo, tallo y raíz



3.4. Resultados de los valores promedio de la remoción de plomo en suelo, en términos de porcentaje (%)

Valores promedio de remoción de plomo (%) para el cultivo con “haba”, a nivel de suelo en los cuatro tratamientos y su control

La Tabla 8 muestra los valores promedio de la remoción de plomo en suelo, obtenidos en los cuatro tratamientos y su control. El porcentaje de remoción de plomo más bajo estuvo en el tratamiento T1 ($73,95 \pm 0,24$ %) y el valor promedio más alto se obtuvo en T4 ($90,80 \pm 0,82$ %).

Tabla 8

Valores promedio de remoción de plomo (%) en el cultivo con “haba”, a nivel de suelo en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)

| Tratamientos | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Control | T1 | T2 | T3 | T4 |
| 76,19 | 74,07 | 85,16 | 88,47 | 90,89 |
| 76,91 | 74,11 | 85,88 | 88,89 | 89,94 |
| 75,47 | 73,67 | 84,67 | 87,84 | 91,57 |
| 76,19 ± 0,72 | 73,95 ± 0,24 | 85,24 ± 0,61 | 88,40 ± 0,52 | 90,80 ± 0,82 |

Valores promedio de remoción de plomo (%) para el cultivo con “tarwi”, a nivel de suelo en los cuatro tratamientos y su control

La Tabla 9 muestra los valores promedio de la remoción de plomo en suelo, obtenidos en los cuatro tratamientos y su control. El porcentaje de remoción de plomo más bajo estuvo en el tratamiento T2 (74,55 ± 0,44 %) y el valor promedio más alto se obtuvo en T4 (86,95 ± 0,54 %).

Tabla 9

Valores promedio de remoción de plomo (%) en el cultivo con “tarwi”, a nivel de suelo en los cuatro tratamientos y su control (promedio±DS)

| Tratamientos | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Control | T1 | T2 | T3 | T4 |
| 64,12 | 79,86 | 74,55 | 76,28 | 86,95 |
| 64,79 | 80,47 | 74,99 | 76,87 | 86,41 |
| 63,44 | 79,16 | 74,10 | 75,69 | 87,50 |
| 64,12 ± 0,67 | 79,83 ± 0,66 | 74,55 ± 0,44 | 76,28 ± 0,59 | 86,95 ± 0,54 |

3.5. Resultados de la variación promedio de fósforo en el suelo

La Tabla 10 muestra los valores promedio del fósforo en el suelo para cultivo de “haba” y “tarwi” para los tratamientos y su control. El tratamiento control para el cultivo de “haba” registró un valor promedio de $6,2 \pm 0,2$ mg/L. El valor promedio más alto se obtuvo en T1 ($5,8 \pm 0,2$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T3 ($4,9 \pm 0,3$ mg/L).

Mientras que para el cultivo de “tarwi” el tratamiento control registró el valor promedio de $5,1 \pm 0,3$ mg/L. El valor promedio más alto se obtuvo en T1 ($6,2 \pm 0,5$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T3 ($4,2 \pm 0,3$ mg/L) (Figura 11).

Los resultados del análisis de varianza muestran que el cultivo de “haba” y “tarwi”, tuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$), en relación a la variación promedio de fósforo frente a todos los tratamientos (ver Apéndice 1 y 2). El análisis de Tukey muestra que el tratamiento T3 y Control presentaron diferencia significativa en cuanto a la acumulación de fósforo, a diferencia de los tratamientos T1, T2 y T4 que tuvieron similar acumulación (no presentaron diferencia significativa) (ver Apéndice 8). Así mismo, se observó que en el cultivo de “tarwi” las medias de los tratamientos T2, T3 y T4 tienen similar acumulación (no presentan diferencia significativa) a diferencia del tratamiento T1 y Control presentaron diferentes concentraciones (si presentaron diferencia significativa) (ver Apéndice 15).

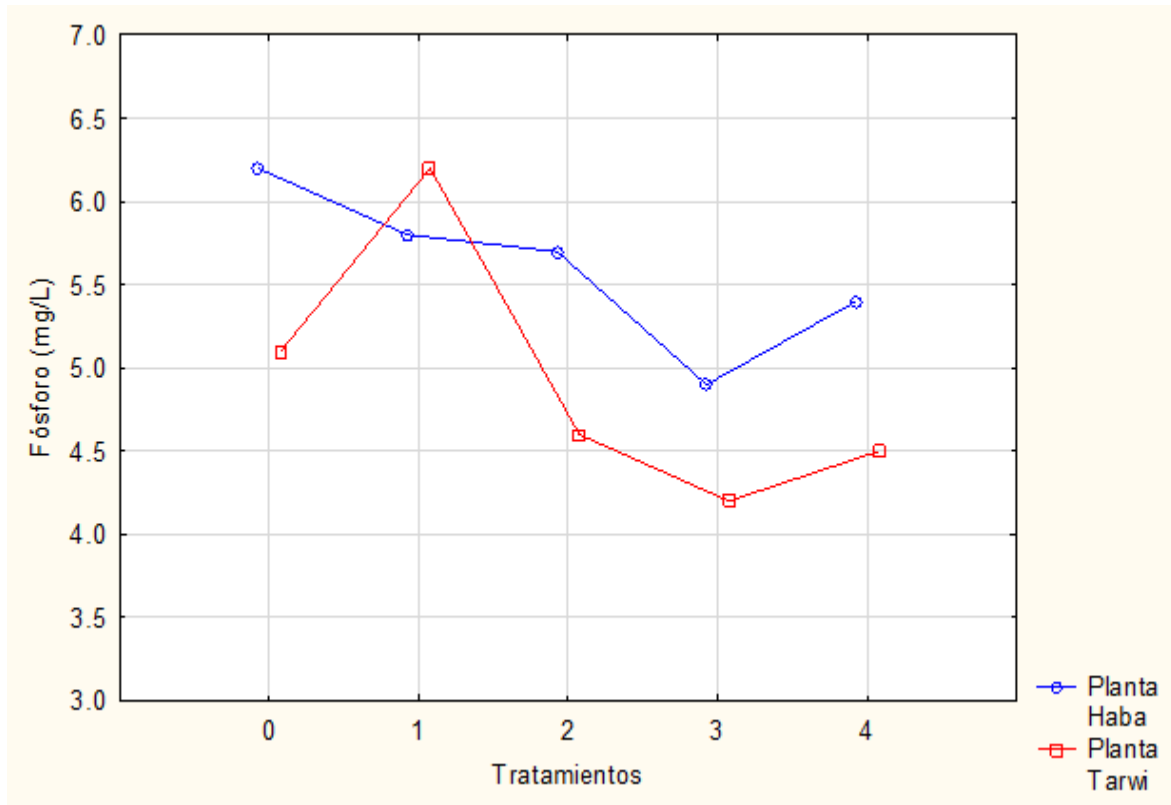
Tabla 10

Valor promedio de fósforo (mg/L) en el cultivo con “haba” y “tarwi” en suelo (promedio±DS)

| Tratamiento | Haba | Tarwi |
|-------------|------------------|------------------|
| Control | 6,2 | 5,1 |
| | 6,4 | 5,4 |
| | 6,0 | 4,8 |
| | 6,2 ± 0,2 | 5,1 ± 0,3 |
| T1 | 5,8 | 6,2 |
| | 5,6 | 6,7 |
| | 6,0 | 5,7 |
| | 5,8 ± 0,2 | 6,2 ± 0,5 |
| T2 | 5,7 | 4,6 |
| | 5,2 | 4,1 |
| | 6,2 | 5,1 |
| | 5,7 ± 0,5 | 4,6 ± 0,5 |
| T3 | 4,9 | 4,2 |
| | 5,2 | 4,5 |
| | 4,6 | 3,9 |
| | 4,9 ± 0,3 | 4,2 ± 0,3 |
| T4 | 5,4 | 4,5 |
| | 5,8 | 4,1 |
| | 5,0 | 4,9 |
| | 5,4 ± 0,4 | 4,5 ± 0,4 |

Figura 11

Variación de fósforo (mg/L) para el cultivo de “haba” y “tarwi” en los distintos tratamientos y control



3.6. Resultados para el factor de traslocación de plomo para el cultivo de “haba” y “tarwi”

La Tabla 11 y la Figura 12 muestra los resultados del factor de traslocación (FT) del cultivo de “haba” y “tarwi” para los tratamiento y control. El tratamiento control para el cultivo de “haba” registró el valor promedio de $0,31 \pm 0,03$. El valor promedio más alto se obtuvo en el tratamiento T4 ($0,58 \pm 0,08$) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T1 ($0,38 \pm 0,04$).

El tratamiento control para el cultivo de “tarwi”, registró el valor promedio de $0,83 \pm 0,15$ de factor de traslocación. El valor promedio más alto se obtuvo en el tratamiento T3 ($1,15 \pm 0,14$) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T2 ($0,80 \pm 0,07$).

Los resultados del análisis de varianza muestran que el cultivo de “haba” presentó una diferencia significativa ($p < 0,05$), en relación al factor de traslocación frente a todos los tratamientos (ver Apéndice 1). Por otra parte, el cultivo de “tarwi” no tuvo una diferencia significativa ($p > 0,05$) (ver Apéndice 2). El análisis de Tukey para el cultivo de “haba” muestra que las medias del tratamiento T4 y Control tienen diferente factor de traslocación (si presentan diferencia significativa), a diferencia del tratamiento T1, T2, T3 que presentan similar factor de traslocación (no presentan diferencia significativa) (ver Apéndice 9). Así mismo, el cultivo de “tarwi” muestra que las medias de los tratamientos T1, T2, T3, T4 y Control tienen similar factor de traslocación, por lo tanto, no presentan diferencia significativa (ver Apéndice 16).

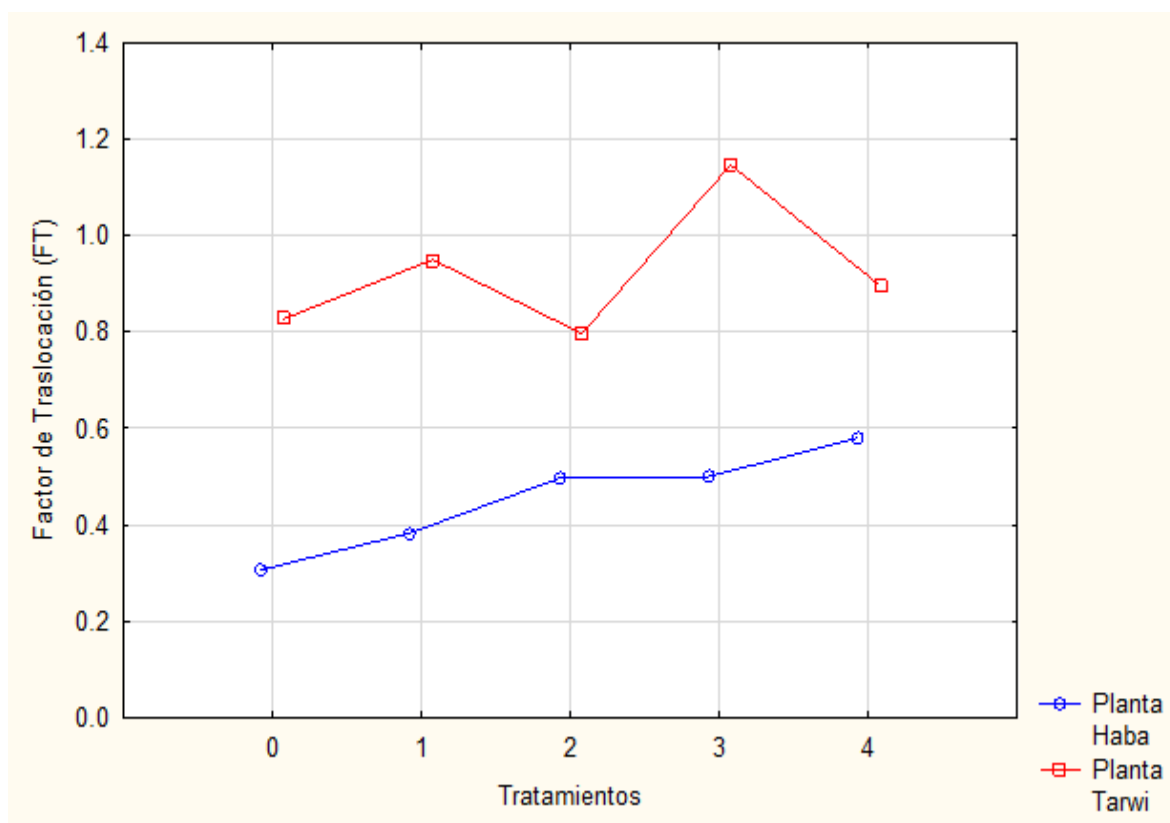
Tabla 11

Factor de Traslocación (FT) en cultivo de “haba” y “tarwi”

| Tratamiento | Haba | Tarwi |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| Control | 0,31 | 0,83 |
| | 0,28 | 0,97 |
| | 0,33 | 0,68 |
| | 0,31 ± 0,03 | 0,83 ± 0,15 |
| T1 | 0,38 | 0,94 |
| | 0,42 | 1,11 |
| | 0,35 | 0,8 |
| | 0,38 ± 0,04 | 0,95 ± 0,16 |
| T2 | 0,5 | 0,8 |
| | 0,5 | 0,86 |
| | 0,49 | 0,73 |
| | 0,50 ± 0,01 | 0,80 ± 0,07 |
| T3 | 0,43 | 1,14 |
| | 0,56 | 1,01 |
| | 0,51 | 1,29 |
| | 0,5 ± 0,07 | 1,15 ± 0,14 |
| T4 | 0,58 | 0,87 |
| | 0,66 | 1,12 |
| | 0,5 | 0,7 |
| | 0,58 ± 0,08 | 0,90 ± 0,21 |

Figura 12

Factor de traslación para el cultivo de “haba” y “tarwi” en los distintos tratamientos y control



CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Índice de supervivencia

Arribalzaga (2007) indicó que el índice de supervivencia es una herramienta que permite evaluar el número de individuos que sobreviven en un tiempo determinado. En la presente investigación se obtuvo un índice de supervivencia alto en T3, con un valor promedio de $(1,02 \pm 0,08)$ y un valor promedio bajo en T1 de $(0,66 \pm 0,04)$ dado que fueron sometidos a 60 días de exposición máxima al metal pesado plomo en *Vicia faba*. Asimismo, se obtuvo un índice de supervivencia para *Lupinus mutabilis* con un valor promedio alto en T3 $(0,83 \pm 0,17)$ y un valor promedio bajo en T2 $(0,5 \pm 0,3)$. Similares tiempos de exposición para determinar el índice de supervivencia fueron registrados por Maguiña (2017) en *Lupinus mutabilis* sometidos a tratamientos con cadmio, con un tiempo de 65 días, donde T1 y T3 obtuvieron igual valor de 0,66 de índice de supervivencia, mientras T4 presentó un valor de índice de supervivencia de 0,33.

Por otra parte, Martell (2014) utilizó especies de *Beta vulgaris* L. y *Lolium perenne* L. para evaluar la capacidad de acumulación de metales pesados, por lo que se obtuvo un índice de supervivencia de 0,85 y 1 respectivamente al cabo de la semana 16. Por lo referido anteriormente, se encontró valores similares en cuanto al índice de supervivencia, aunque presentaron diferentes tiempos de exposición. Por lo tanto, las investigaciones sugieren que el índice de supervivencia está relacionado con el tiempo al que están expuestos las diferentes especies de plantas.

4.2. Concentración y remoción de plomo en el suelo

La concentración de metales pesados en los suelos es importante para determinar el grado de contaminación a la que pueden estar expuestas las diversas especies de plantas. En esta investigación la concentración promedio más alta de plomo en el suelo para el cultivo de

haba se obtuvo en T1 ($5,94 \pm 0,06$) mg/L y la concentración promedio más bajo se obtuvo en T3 ($3,34 \pm 0,15$) mg/L. Mientras que el valor promedio más alto de plomo en el suelo para el cultivo de tarwi, se obtuvo en T3 ($6,83 \pm 0,17$) mg/L y el valor promedio más bajo se obtuvo en T1 ($4,60 \pm 0,15$) mg/L. Maguiña (2017) quien trabajó con *Lupinus mutabilis* sometidos a tratamientos con cadmio en la que mostró, que el sustrato evaluado presentó una disminución de la concentración de cadmio, donde obtuvo que para el tratamiento T1 (4 mg de CdSO₄/L + Solución nutritiva), solo quedó 2,21 mg/kg, para T2 (8 mg de CdSO₄/L + Solución nutritiva) quedó 6,412 mg/kg, para T3 (12 mg de CdSO₄/L+ Solución nutritiva) quedó 10,68 mg/kg y para T4 (16 mg de CdSO₄/L + Solución nutritiva) quedó 12,59 mg/kg.

De la misma forma, se han evaluado las concentraciones de plomo en otras especies vegetales; así Díaz (2017) quien trabajó con ortiga (*Urtica urens* L.), al principio de su investigación encontró un valor alto (1 120,87 mg/kg) y un valor bajo (1 117,91 mg/kg) en relación al plomo. Luego de ser aplicados los tratamientos, finalmente se observó que hubo una reducción de plomo, la concentración más alta fue en el tratamiento R5 (1 015,28 mg/kg) y la concentración más baja se obtuvo en el tratamiento R4 (1 006,27 mg/kg). Por último, León (2017) en su estudio con especies altoandinas observó que la concentración inicial de plomo fue 1 956,90 mg/kg. Después de los tratamientos se obtuvo como resultados que la concentración de plomo en el suelo fue 1 790,66 mg/kg en la especie *Achyrocline alata* (Kunth) DC. y en la especie *Werneria nubigena* Kunth la concentración de plomo fue de 1 512,28 mg/kg. De manera similar la especie *Juncus arcticus* Willd presentó una concentración de 2 160,75 mg/kg de plomo. Finalmente, las características físicoquímicas del suelo, afectan la biodisponibilidad y la solubilidad del plomo, es decir, que al aumentar el pH en el suelo disminuye la biodisponibilidad, debido a la competencia del plomo y otros cationes (Adriano, 2001). Asimismo, Brus *et al.* (2002) indicaron que las características y propiedades del suelo, serán las que determinan la transferencia de los metales pesados hacia las plantas. En relación con los estudios se aprecia que hubo una ligera disminución de los metales pesados.

Un factor importante dentro del proceso de fitorremediación es el pH ya que influye en la fertilidad del suelo y en la biodisponibilidad de minerales como los metales pesados. La presente investigación presentó valores de pH de 7,0 a 8,6 lo cual expresa una tendencia

alcalina del suelo. Valores similares a este pH fueron registrados por Wang *et al.* (2010) quienes utilizaron *Vicia faba* en suelos contaminados con plomo, obteniendo valores de pH de 7,1 a 7,4 lo que indica que el pH del suelo fue favorable para el desarrollo de la planta. Otros autores como García *et al.* (2012) utilizaron *Vicia faba* en suelos contaminados con plomo, obteniendo valores de pH de 7,2, mientras que Díaz (2017) quien utilizó *Urtica urens* en suelos contaminados con plomo, obtuvo valores de pH de 7,75 a 7,86. Las investigaciones evidencian que el incremento de pH en el suelo genera una disminución de la solubilidad de metales pesados, del mismo modo Mc Bride (1994) mencionó que los metales pesados son móviles a pH bajo, en forma de compuestos organometálicos solubles o especies iónicas libres y a pH alcalinos son retenidos en forma de carbonatos o fosfatos insolubles.

La remoción es un factor importante ya que permite saber cuál es la cantidad removida de un contaminante, tomando en cuenta un tiempo inicial y final. Para esta investigación el porcentaje de remoción más bajo de plomo en el cultivo de haba, se obtuvo en el tratamiento T1 ($73,95 \pm 0,24$ %) y el valor promedio más alto se obtuvo en T4 ($90,80 \pm 0,82$ %), mientras que el porcentaje de remoción de plomo más bajo en el cultivo de tarwi estuvo en el tratamiento T2 ($74,55 \pm 0,44$ %) y el valor promedio más alto se obtuvo en T4 ($86,95 \pm 0,54$ %), por lo mencionado anteriormente se observa que hay una mayor remoción de plomo y que los valores oscilan en los rangos de 73,95 y 90% de remoción.

A diferencia de otras investigaciones que utilizaron diferentes especies como *Zea mays* L. para la remoción de plomo, reportaron valores del 2,25 % de remoción (Chiwetalu *et al.*, 2020). Por el contrario, Grandez (2017) determinó la remoción de metales pesados en suelo contaminado, utilizó *Helianthus annuus* y *Zea mays* L. donde obtuvo un 11 % de remoción de cadmio y 9,951 % de remoción de plomo con las respectivas plantas cultivadas. Otros autores como Cho-Ruk *et al.* (2006), utilizaron especies perennes como *Alternanthera philoxeroides*, *Sanvitalia procumbens* y *Portulaca grandiflora* en la remoción de suelos contaminados, donde obtuvieron como resultados que la concentración de plomo en el suelo disminuyó entre 30-80 % ($62,61-23,18$ mg/kg de suelo). Por lo tanto, se concluye que los valores altos de remoción son debido a la adaptabilidad y tolerancia de las especies a los metales pesados y los valores bajos es debido al pH bajo, tal como lo indicó Febres (2019),

a medida que el pH aumenta, el Pb es removido con mayor eficiencia, debido a la alta alcalinidad del pH.

4.3. Concentración de fósforo en el suelo

El fósforo es considerado un macroelemento importante y esencial para el crecimiento de las plantas, debido a que promueve la absorción de otros nutrientes y participa en el proceso de la fotosíntesis. En la presente investigación, los niveles de la variación promedio de fósforo más alto en el cultivo de haba, se obtuvo en T1 ($5,8 \pm 0,2$ mg/L) y el valor promedio más bajo se obtuvo en T3 ($4,9 \pm 0,3$ mg/L). Similares resultados se obtuvieron para el cultivo de tarwi, el valor promedio más alto estuvo en T1 ($6,2 \pm 0,5$ mg/L) y el valor promedio más bajo en T3 ($4,2 \pm 0,3$ mg/L), por lo que se puede apreciar que hubo un ligero aumento de fósforo que luego fue disminuyendo.

En este sentido, se han hecho investigaciones con otras especies de plantas, como la de Martell (2014) quien trabajó con *Beta vulgaris* L. y *Lolium perenne* L. obteniendo como resultados los valores de fósforo en suelo sin tratamiento (control) de 4,25 mg/L y con tratamiento de 17 mg/L. Otros autores como Paiva (2015), evidenció altas concentraciones de fósforo 68 mg/L, en *Amaranthus spinosus* en suelos contaminados con plomo. Por lo tanto, la reducción de fósforo en el suelo se puede explicar cómo una incorporación por parte de las hojas en forma de ácido fítico, el papel del fosfato también se ha evocado como un importante factor de control de la transferencia de metal del suelo a la planta. De igual manera, el fósforo es absorbido por la planta como ion orto fosfato primario y ion fosfato secundario a medida que el pH se incrementa (Múnera, 2014).

4.4. Factor de traslocación

El factor de traslocación es fundamental para medir la relación de la concentración de un metal pesado, entre la parte aérea y la parte de la raíz de una planta. En la presente investigación se evaluó el transporte interno de metales a través del factor de traslocación para las plantas de haba y tarwi, se obtuvieron valores promedios más altos de 0,58 (T4) y 1,15 (T3) respectivamente, el desarrollo de las plantas se dio en un suelo de textura franco. A diferencia de García *et al.* (2011) quien obtuvo un factor de traslocación de 0,09 de plomo

en haba, en suelo de tipo franco arcilloso. Asimismo, Baker y Brooks (1989) agregan que si el FT mayor a 1, presenta alto potencial hiperacumulador lo que indica que posee una gran capacidad de transportar metales desde las raíces a los órganos aéreos de la planta y si el FT menor a 1 se considera fitoestabilizador por tener una mayor concentración de metal en las raíces.

De la misma forma, otras investigaciones evaluaron el factor de traslocación en especies diferentes, por ejemplo, Chávez (2014), quien utilizó *Voltiver*, *calamagrostis* y *Nicotiana* en suelos de características franco limoso, obteniendo como resultados 0,14, 0,31 y 0,39 de factor de traslocación respectivamente, lo que indica que posee un alto valor fitoestabilizador. Del mismo modo, León (2017) trabajó con las especies *Archyrocline alata* (Kunth), *Werneria nubigena* kunth en suelos arenosos, en las que ha reportado valores del factor de traslocación de 0,16 y 0,00 respectivamente, siendo clasificadas como fitoestabilizadora, a diferencia de *Juncus arctus* willd se reportó un valor de 2,46 de factor de traslocación, considerada como hiperacumuladora. Finalmente, Falcon (2017), quien trabajó con *Zea mayz* L. en la fitoextracción de plomo, en tres lotes de terreno (A, B y C) obtuvo como resultados un factor de traslocación de 0,20 para el lote A y B y 0,53 para el lote C, en suelos franco arcilloso.

Es importante destacar que las clases texturales del suelo tendrán un efecto sobre la disponibilidad de metales pesados, según lo señalado por Bravo *et al.* (2014) quienes consideraron que la presencia de metales pesados en el suelo, se debe principalmente a sus propiedades y textura (suelos arcillosos, limosos y arenosos).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

- *Vicia faba* L. “haba” presentó mayor índice de supervivencia en T3 (1,02) en comparación con *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” T3 (0,83), esto se debe que el haba tiene mayor capacidad de tolerancia al plomo.
- *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” concentro mayor plomo en suelo, siendo el tratamiento T3 (6,83 mg/L) y T2 (6,31 mg/L), lo que significa que si presentaron diferencia significativa entre ambas. Por el contrario, la planta que realizó una mayor remoción fue *Vicia faba* L. “haba”, siendo el tratamiento T4 la más alta con 90,80 % de remoción de plomo en el suelo. Estos resultados muestran al haba como una planta de mayor capacidad de fitorremediación.
- La mayor concentración de fósforo en el suelo para *Vicia faba* L. “haba”, fue en el tratamiento T1 (5,8 mg/L), del mismo modo la mayor concentración para *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” se dio en el tratamiento T1 (6,2 mg/L), lo que indica que si presentan diferencia significativa entre ambas especies.
- *Vicia faba* L. “haba” presentó un factor de traslocación (FT) de 0,38 a 0,58, por lo que se considera una especie fitoestabilizadora por que presenta un valor menor a 1, a diferencia del *Lupinus mutabilis* Sweet “tarwi” cuyos valores fueron de 0,80 a 1,15 lo que indica que es una especie que se comporta como estabilizadora e hiperacumuladora.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Se sugiere utilizar otras especies de plantas fabaceae en este tipo de investigación para comparar la capacidad fitorremediadora frente a metales pesados.
- Se recomienda la extensión de la investigación, con la finalidad que las plantas completen su estadio fenológico.
- Se recomienda hacer evaluaciones periódicas para ver el comportamiento de las especies.
- Se sugiere evaluar otras especies con características de ser hiperacumuladoras, ya que estas podrían realizar una mayor extracción de metales.

REFERENCIAS

- Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals [Elementos traza en ambientes terrestres: Biogeoquímica, biodisponibilidad y riesgos de los metales]. Springer-Verlag, 1(2), 1-867. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Agudelo, B. L. M., Macias, M. K. I., y Suárez, M. A. J. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Lasallista de Investigación*, 2(1), 57-60. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520110>
- Alejo, R. J., Valer, B. F., Pérez, S. J., Canales, S. L., y Bustinza, U. V. (2014). *Manejo de pastos naturales altoandinos*. Programa de Adaptación al Cambio Climático. <https://pdf4pro.com/cdn/accper-250-60257.pdf>
- Apaza, A. D. W. (2015). *Remoción de metales plomo (Pb) y zinc (Zn) de las aguas del río Toro Qocha por precipitación alcalina en la ciudad de Juliaca*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Del Altiplano]. Repositorio institucional Vicerrectorado de investigación. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1774/Apaza_Asqui_Derly_Willer.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arribalzaga, E. B. (2007). Interpretación de las curvas de supervivencia. *Revista Chilena de cirugía*, 59(1), 75-83.
- Baird, C. (2004). Química ambiental Barcelona. *Edit. Reverté*, Segunda Edición.
- Baker, A., y Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - A review of their distribution, ecology and phytochemistry [Plantas superiores terrestres que hiperacumulan elementos metálicos - una revisión de su distribución, ecología y fitoquímica]. *Biorecovery*, 1, 81-126. https://www.researchgate.net/profile/Alan_Baker2/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution_E/links/004635368aaa870046000000.pdf
- Balderrama, F., Iriate, V., Barea, O., Iporre, A., y Carrasco, E. (2001). Cadena Agroalimentaria del Haba de Altura para Exportación. *Fundación PROINPA*, 2-3. <https://www.proinpa.org/tic/pdf/Hortalizas%20y%20leguminosas/Haba/pdf50.pdf>
- Becerril, J. M., Barrutia, O., García Plazaola, J. I., Hernández, A., Olano, J. M., y Garbisu, C. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos

ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*, 16(2), 50-55.
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/128/125>

Bonilla, V. S. M. (2013). *Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación*. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Campus Sur]. Repositorio institucional Universidad Politécnica Salernitana.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4400/6/UPS-ST000985.pdf>

Bravo, R. I., Arboleda, P. C. A., y Martín, P. F. J. (2014). Efecto de la calidad de materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta agronómica*, 63(2), 164-174.
<https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>

Brus, D. J., De Gruijter, J. J., Walvoort, D. J. J., De Vries, F., Bronswijk, J. J. B., Romkens, P. F. A. M., y De Vries, W. (2002). Mapping the probability of exceeding critical thresholds for cadmium concentrations in soil in the Netherlands [Mapeo de la probabilidad de exceder los umbrales críticos para las concentraciones de cadmio en suelos en los Países Bajos]. *Journal of Environment Quality*, 31(6), 1875-1884.
<https://doi.org/10.2134/jeq2002.1875>

Canahua, M. A., y Roman, C. P. (2016). Tarwi: Leguminosa andina de gran potencial. *Leisa revista de agroecología*, 32(2), 20-21. <http://www.leisa-al.org/web/index.php/volumen-32-numero-2>

Carpena, R. O., y Bernal, P. M. (2007). Clave de la fitorremediación: Fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16(2), 1-3.

Castro, G. J. R. (2013). *Capsicum annum L. como fitorremediador de suelos contaminados por metales pesado*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/?q=Capsicum%20annuum%20L.%20CO%20MO%20FITORREMEDIADOR%20DE%20SUELOS%20CONTAMINADOS%20POR%20METALES%20PESADOS>.

Chávez, R. L. (2014). *Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina Facultad de Ciencias]. Repositorio institucional de la Universidad Agraria La Molina.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2435/T01-C517-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Chiwetalu, U. J., Mbajiorgu, C. C., y Ogbuagu, N. J. (2020). Remedial ability of maize (*Zea-Mays*) on lead contamination under potted condition and noo-potted field soil condition [Capacidad correctiva del maíz (*Zea-Mays*) sobre la contaminación por plomo en condiciones de suelo de campo en maceta y sin maceta]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5 (1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.006>
- Cho-Ruk, K., Kurukote, J. Supprung, P., y Vetayasuporn, S. (2006). Perennial Plants in the Phytoremediation of Lead-contaminated Soils [Plantas perennes en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo]. *Biotechnology*, 5(1), 1-4. <https://scialert.net/abstract/?doi=biotech.2006.1.4>
- Ciampitti, I. A., y García, F. O. (2007). Requerimientos Nutricionales Absorción y Extracción de Macronutrientes y Nutrientes secundarios. II. Hortalizas, Frutales y Forrajeras. *Instituto Internacional de Nutrición Vegetal*, 1-4. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/\\$FILE/AA%2012.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/$FILE/AA%2012.pdf)
- Coyago, E., y Bonilla, S. (2016). Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 23(1), 35-46. doi:10.17163/lgr.n23.2016.04
- Cruz, C. E., Can, C. A., Sandoval, V. M., Bugarín, M. R., Robles, B. A., y Juárez, L. P. (2012). Sustratos en la horticultura. *Bio Ciencias*, 2(2), 17-26.
- Cunningham, S. D., Berti, W. R. y Huang, J. W. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in biotechnology*, 13(9), 393-397
- Cunningham, S. D. y Berti, W. R. (1993). Remediation of contaminated soils with green plants: An overview. *In Vitro Cellular y Developmental Biology-Plant*, 29(4), 207-212. doi.org/10.1007/BF02632036
- Dauber, E., Terán, J., y Guzmán, R. (2000). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 1-10.
- Decreto Supremo N° 002. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 25 de marzo de 2013. pp. 1-4.
- Delgadillo, L. A. E., Gonzáles, R. C. A., Prieto, G. F., Villagómez, I. J. R. y Acevedo, S. O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical*

- Díaz, D. M. Y. (2017). *Capacidad de acumulación de la ortiga (Urtica urens) para la fitorremediación de suelos contaminados con plomo en la Oroya, Junín, 2017*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional Universidad Cesar Vallejo. <http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/6866/DIAZ%20-DYM.pdf?>
- Diez, L. J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. [Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela Departamento de Edafología e Química Agrícola]. Repositorio institucional Universidad de Santiago de Compostela. https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf
- Eapen, S. y D'Souza, S. F. (2005). Perspectivas de la ingeniería genética de las plantas para la fitorremediación de metales tóxicos. *Biotechnol Adv.*, 97-114.
- Falcon, E. J. V. (2017). *Fitoextracción de metales pesados en suelo contaminado con Zea mays L. en la estación experimental el Mantaro-Junin en el año 2016*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4611>
- Febres, F. S. E. (2019). *Remediación de suelos contaminados con plomo (Pb) mediante el empleo de girasol (Helianthus annuus) y estiércol de lombriz rojo (Eisenia foetida) en condiciones controladas*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12074>
- Fernández, L. L. C., Roja, A. N. G., Roldan, C. T. G., Ramírez, I. M. E., Zegarra, M. H. G., Hernández, R. U., Reyes, Á. R. J., Flores, H. D y Arce, O. J. M. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicados a la remediación de sitios contaminados. *Instituto Mexicano de Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología*, 19-21.
- Garbisu, C., Amézaga, I., y Alkorta, I. (2002). Biorremediación y Ecología. *Ecosistemas*, 1-2.

- García, G. E., García, N. E., Juárez, S. L. F., Juárez, S. L., Montiel, G. J. M. y Gómez, C. M. A. (2012). La respuesta de haba (*vicia faba*, L.) cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 119-126. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023178002>
- García, G. E., Hernández, A. E., García, N. E. y Acevedo, S. O. A. (2011). Contenido y traslocación de plomo en avena (*Avena sativa*, L.) y haba (*vicia faba*, L.) de un suelo contaminado. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 19-29. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62917370002>
- Grandez, A. M. G. A. (2017). *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas*. [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú]. Repositorio institucional Universidad Cesar Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3537>
- Guerra, P. R. (2014). *Diagnóstico de las plagas y enfermedades en el cultivo de haba (*vicia faba*) en la localidad de Huarcaya Sarhua-Victor Fajardo Ayacucho*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú]. Repositorio institucional Universidad Nacional de Huancavelica. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/676178e7-4df6-4c3a-9d00-719103088895>
- Hazrat, A., Ezzat, K. y Muhammad Anwar, S. (2013). Phytoremediation of heavy metals- Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Hernández, S. R., Fernández, C. C. y Baptista, L. M. (2010). Metodología de la investigación (5ta ed.). Editorial McGraw-Hill Interamericana. México D.F.
- Jara, P. E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M. y Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista peruana de biología*, 21(2), 145-154. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817>
- Kaemmerer, M. (2003). Valoración biológica de desechos orgánicos y evaluación de su potencial para utilizarlos en la remediación de suelos contaminados. *Proyecto de investigación*.
- Krämer, U. (2005). Phytoremediation: Novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 16(2), 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.02.006>

- Lallana, V. H., Elizalde, J. H. y García, L. F. (2005). Germinación y Latencia de semillas y yemas. *Cátedra de Fisiología Vegetal-Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Entre Ríos*, 1-22.
- León, M. V. A. (2017). *Capacidad fitorremediadora de especies altoandinas para suelos contaminados por metales pesados procedentes de la compañía minera Licuna SAC, en condiciones de invernadero, 2015-2016*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio institucional Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/1900/T033_72513051_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ley 27262 de 2000. Por la cual se expide la ley general de semillas. (2000) D. O. N° 7264. [https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/LegislacionSemillas/LeyGeneralSemillas\(Ley027262\)modificada.pdf](https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/LegislacionSemillas/LeyGeneralSemillas(Ley027262)modificada.pdf)
- López, L. A. (2007). Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados. *Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia*. 70-98
- López, M. S., Gallegos, M. M. E., Pérez, F. L. J., y Gutiérrez, R. M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticos. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 21(2), 91-100. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n2/0188-4999-rica-21-02-91.pdf>
- Maguiña, C. L.F. (2017). *Determinación de la capacidad fitorremediadora de Lupinus mutabilis Sweet "chocho o tarwi" en suelos contaminados con cadmio (Cd)*. [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio institucional Universidad Ricardo Palma. [http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1708/Magui% c3% b1a_1.pdf](http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1708/Magui%c3%b1a_1.pdf)
- Martell, M. N. (2014). *Acumulación de metales pesados en Beta vulgaris L. y Lolium perenne L. de suelos de cuemanco*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuemanco, México]. Repositorio institucional Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2014/abril/0711948/0711948.pdf>
- Mc Bride, M. B. (1994). Environmental chemistry of soil. *Oxford University Press*, 240-272.
- McGrath, S. P y Zhao, F. J. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(3), 277-282. [doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00060-0](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00060-0)

- Ministerio del Ambiente. (2016). Glosario de términos sitios contaminados. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2012). Glosario de términos para la formulación de proyectos ambientales. <https://studylib.es/doc/5792717/glosario-de-t%C3%A9rminos-para-la-formulaci%C3%B3n-de-proyectos-amb...>
- Moreno, J. E. (2010). *Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante fitotecnologías*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España]. Repositorio institucional Biblos-e Archivo. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/4754>
- Múnera, V. G. A. (2014). El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. *Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira*, 1-52. <https://hdl.handle.net/11059/5248>
- Núñez, L. R. A., Meas, V. Y., Ortega, B. R., y Olguín, E. J. (2004). Fitorremediación: Fundamentos y aplicaciones. *Biotecnología y biología molecular*, 69-82
- Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria [OIRSA] (2020). Guía para uso de cloro en desinfección de frutas y hortalizas de consumo fresco, equipos y superficies en establecimientos. <https://www.oirsa.org/contenido/2020/Guia%20para%20uso%20de%20cloro%20como%20desinfectante%20en%20establecimientos%2023.06.2020.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2018). La contaminación del suelo: una realidad oculta. <http://www.fao.org/news/story/es/item/1127218/icode/>
- Paiva, P. G. M. (2015). *Fitorremediación de suelos contaminados con plomo utilizando *Amaranthus spinosus*-Amaranthaceae en Cusco del 2012*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio institucional Universidad Católica de Santa María. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/UCSM/5190/9I.0337.DR.pdf>
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., y Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5(1-2), 149-155. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34150220>
- Ramírez, V. A. (2005). El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo. *Anales de la Facultad de Medicina*, 66(1), 57-70

Rodríguez, O. J. C., Rodríguez, F. H., de Lira Reyes, G., Martínez de la Cerda, J., y Lara, M. J. (2006). Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(3), 239-245.

Sistema Nacional de Emergencias y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). Manual para la construcción de invernáculos. *Programa huertas en centros educativos*, 1-14. <http://www.fao.org/3/a-i7293s.pdf>

Soluciones Nutritivas. (2016). Solución NPK. <https://www.solucionesnutritivasltd.com/producto/solucion-npk/>

Suca A, G. R., y Suca A, C. A. (2015). Potencial del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) como futura fuente proteínica y avances de su desarrollo agroindustrial. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 18(2), 55-71.

Tapia, M. E. (2015). El tarwi lupino andino. *Fondazione L'albero della Vita Onlus*, 28-31. <http://fadvamerica.org/wp-content/uploads/2017/04/TARWI-espanol.pdf>

Universidad Nacional Agraria La Molina. (2003). Solución hidropónica la Molina. http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/Boletin52/Formula_Tomate.pdf

Volke, S. J. A., Velasco, T. y Pérez De la Rosa, D. A. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su rendimiento. *Instituto Nacional de Ecología - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 141.

Wang, C. R., Tian, Y., Wang, X. R., Yu, H. X., Lu, X. W., Wang, C., y Wang, H. (2010). Hormesis effects and implicative application in assessment of lead-contaminated soils in roots of Vicia faba seedlings [Efectos de la hormesis y aplicación implicativa en la evaluación de suelos contaminados con plomo en raíces de plántulas de Vicia faba]. *Chemosphere*, 80(9), 965-971. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.049>

TERMINOLOGÍA

- **Absorción:** Se comprende por absorción a la cantidad total de nutrientes absorbidos por un cultivo durante su ciclo de crecimiento y desarrollo (Ciampitti y García, 2007).
- **Biomasa aérea:** Hace referencia a la materia orgánica aérea viva o seca, como son las hojas, la corteza, las ramas y el fuste de una planta o árboles, se caracterizan por presentar un DAP (diámetro a la altura del pecho) superiores a los 10 cm (Dauber y Guzmán, 2000).
- **Biorremediación:** La biorremediación es un proceso que consiste en utilizar organismos vivos y que estos tengan habilidades catalíticas para eliminar, degradar, transformar y neutralizar contaminantes en ecosistemas como el suelo y el agua. (Garbisu *et al.*, 2002).
- **Especie altoandina:** Se considera especie altoandina a la vegetación natural que se desarrollan en las regiones altoandinas por encima de los 3500 msnm y que presentan un clima húmedo (Alejo *et al.*, 2014).
- **Exposición:** Es el contacto entre el agente estresante (metales pesados) y el componente ecológico (vegetación) (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2016).
- **Germinación:** Es el proceso metabólico mediante el cual un organismo empieza a crecer, a partir de la evolución de un embrión en una plántula capaz de valerse por sí misma hasta llegar a transformarse en una planta con la capacidad de realizar fotosíntesis y competir frente a otras (Lallana *et al.*, 2005).
- **Invernáculo:** Es una instalación destinada al cultivo de plantas, su estructura puede ser de metal o madera permitiendo que una persona pueda trabajar y tomar control de la temperatura, la humedad y la intensidad de luz (Sistema Nacional de Emergencias [SINAE] y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017).

- **Semilla:** Las semillas son estructuras botánicas destinadas a la propagación sexual o asexual de una especie. Su importancia radica en sus propiedades agronómicas, orgánicas, pureza e identidad genética que determinan su potencial de rendimiento (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2000).

- **Suelo contaminado:** Son suelos que han sido alterados negativamente con sustancias contaminantes, que han sido generadas y depositadas por la actividad humana, tal como se menciona en el Decreto Supremo N° 002 (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2013).

- **Sustrato:** Es la composición de materiales orgánicos o inorgánicos (arcillas, arenas o turba) que se utilizan como soporte para la germinación de semillas y cultivo de plantas (Cruz *et al.*, 2012).

- **Tolerancia:** Es la capacidad que tienen los organismos para poder resistir a elevadas concentraciones de compuestos tóxicos presentes en sus tejidos (López, 2007).

- **Textura de suelo:** Es una propiedad física granulométrica del suelo, compuesta de arena, limo y arcilla (MINAM, 2016).

APÉNDICES

Apéndice 1

Resultados de ANOVA de un factor para haba

| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|---------|--------------|----------------------|----|---------------------|---------|------|
| SUELO | Inter-grupos | 15,786 | 4 | 3,947 | 121,832 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,324 | 10 | ,032 | | |
| | Total | 16,110 | 14 | | | |
| TALLO | Inter-grupos | 1,027 | 4 | ,257 | 44,365 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,058 | 10 | ,006 | | |
| | Total | 1,085 | 14 | | | |
| RAIZ | Inter-grupos | 1,005 | 4 | ,251 | 16,079 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,156 | 10 | ,016 | | |
| | Total | 1,162 | 14 | | | |
| FÓSFORO | Inter-grupos | 2,820 | 4 | ,705 | 6,078 | ,010 |
| | Intra-grupos | 1,160 | 10 | ,116 | | |
| | Total | 3,980 | 14 | | | |
| PH | Inter-grupos | 4,311 | 4 | 1,078 | 101,031 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,107 | 10 | ,011 | | |
| | Total | 4,417 | 14 | | | |
| INDICE | Inter-grupos | ,209 | 4 | ,052 | 4,745 | ,021 |
| | Intra-grupos | ,110 | 10 | ,011 | | |
| | Total | ,318 | 14 | | | |
| FACTORT | Inter-grupos | ,140 | 4 | ,035 | 13,843 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,025 | 10 | ,003 | | |
| | Total | ,165 | 14 | | | |

Apéndice 2

Resultados de ANOVA de un factor para tarwi

| | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|---------|--------------|----------------------|----|---------------------|---------|------|
| SUELO | Inter-grupos | 18,978 | 4 | 4,744 | 192,655 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,246 | 10 | ,025 | | |
| | Total | 19,224 | 14 | | | |
| TALLO | Inter-grupos | ,049 | 4 | ,012 | 1,275 | ,343 |
| | Intra-grupos | ,096 | 10 | ,010 | | |
| | Total | ,145 | 14 | | | |
| RAIZ | Inter-grupos | ,098 | 4 | ,025 | 3,915 | ,036 |
| | Intra-grupos | ,063 | 10 | ,006 | | |
| | Total | ,161 | 14 | | | |
| FOSFORO | Inter-grupos | 7,404 | 4 | 1,851 | 11,018 | ,001 |
| | Intra-grupos | 1,680 | 10 | ,168 | | |
| | Total | 9,084 | 14 | | | |
| PH | Inter-grupos | 6,164 | 4 | 1,541 | 59,269 | ,000 |
| | Intra-grupos | ,260 | 10 | ,026 | | |
| | Total | 6,424 | 14 | | | |
| INDICE | Inter-grupos | ,447 | 4 | ,112 | 2,292 | ,131 |
| | Intra-grupos | ,488 | 10 | ,049 | | |
| | Total | ,935 | 14 | | | |
| FACTORT | Inter-grupos | ,230 | 4 | ,058 | 2,531 | ,107 |
| | Intra-grupos | ,227 | 10 | ,023 | | |
| | Total | ,457 | 14 | | | |

Apéndice 3

Prueba de Tukey para el Índice de supervivencia en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Tratamiento 1 | 3 | ,6600 | |
| Tratamiento 4 | 3 | ,8333 | ,8333 |
| Tratamiento 2 | 3 | ,9067 | ,9067 |
| Control | 3 | ,9067 | ,9067 |
| Tratamiento 3 | 3 | | 1,0167 |
| Sig. | | ,094 | ,275 |

Apéndice 4

Prueba de Tukey para pH en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | | | |
|---------------|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Control | 3 | 7,0000 | | | |
| Tratamiento 1 | 3 | | 7,7333 | | |
| Tratamiento 2 | 3 | | | 8,1667 | |
| Tratamiento 3 | 3 | | | 8,3667 | 8,3667 |
| Tratamiento 4 | 3 | | | | 8,4667 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | ,200 | ,759 |

Apéndice 5

Prueba de Tukey para suelo en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | | |
|---------------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Tratamiento 3 | 3 | 3,3400 | | |
| Tratamiento 4 | 3 | 3,3833 | | |
| Tratamiento 2 | 3 | 3,6600 | | |
| Control | 3 | | 4,9500 | |
| Tratamiento 1 | 3 | | | 5,9367 |
| Sig. | | ,262 | 1,000 | 1,000 |

Apéndice 6

Prueba de Tukey para tallo en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | | |
|---------------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Control | 3 | ,9067 | | |
| Tratamiento 1 | 3 | | 1,1467 | |
| Tratamiento 2 | 3 | | 1,1767 | |
| Tratamiento 3 | 3 | | 1,3267 | |
| Tratamiento 4 | 3 | | | 1,7000 |
| Sig. | | 1,000 | ,092 | 1,000 |

Apéndice 7

Prueba de Tukey para raíz en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Tratamiento 2 | 3 | 2,3600 | |
| Tratamiento 3 | 3 | 2,4733 | |
| Control | 3 | | 2,9200 |
| Tratamiento 4 | 3 | | 2,9267 |
| Tratamiento 1 | 3 | | 2,9700 |
| Sig. | | ,798 | ,987 |

Apéndice 8

Prueba de Tukey para Fósforo en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Tratamiento 3 | 3 | 4,9000 | |
| Tratamiento 4 | 3 | 5,4000 | 5,4000 |
| Tratamiento 2 | 3 | 5,7000 | 5,7000 |
| Tratamiento 1 | 3 | 5,8000 | 5,8000 |
| Control | 3 | | 6,2000 |
| Sig. | | ,054 | ,095 |

Apéndice 9

Prueba de Tukey para el Factor de Traslocación (FT) en haba

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | | |
|---------------|---|------------------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Control | 3 | ,3067 | | |
| Tratamiento 1 | 3 | ,3833 | ,3833 | |
| Tratamiento 2 | 3 | | ,4967 | ,4967 |
| Tratamiento 3 | 3 | | ,5000 | ,5000 |
| Tratamiento 4 | 3 | | | ,5800 |
| Sig. | | ,390 | ,099 | ,318 |

Apéndice 10

Prueba de Tukey para el Índice de supervivencia en tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 |
|---------------|---|------------------------------|
| | | 1 |
| Tratamiento 2 | 3 | ,5000 |
| Tratamiento 4 | 3 | ,5333 |
| Tratamiento 1 | 3 | ,6667 |
| Tratamiento 3 | 3 | ,8333 |
| Control | 3 | ,9500 |
| Sig. | | ,168 |

Apéndice 11

Prueba de Tukey para pH en tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjuntos para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|-------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Control | 3 | 7,0000 | |
| Tratamiento 1 | 3 | | 8,5333 |
| Tratamiento 3 | 3 | | 8,6000 |
| Tratamiento 2 | 3 | | 8,6333 |
| Tratamiento 4 | 3 | | 8,6333 |
| Sig. | | 1,000 | ,937 |

Apéndice 12

Prueba de Tukey para suelo en tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | | | |
|---------------|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Tratamiento 1 | 3 | 4,5967 | | | |
| Tratamiento 4 | 3 | 4,8000 | | | |
| Tratamiento 2 | 3 | | 6,3100 | | |
| Tratamiento 3 | 3 | | | 6,8300 | |
| Control | 3 | | | | 7,4600 |
| Sig. | | ,536 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Apéndice 13

Prueba de Tukey para tallo en tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|------------------------------|--|
| | | 1 | |
| Tratamiento 4 | 3 | ,7500 | |
| Tratamiento 2 | 3 | ,7600 | |
| Control | 3 | ,8400 | |
| Tratamiento 1 | 3 | ,8700 | |
| Tratamiento 3 | 3 | ,8900 | |
| Sig. | | ,448 | |

Apéndice 14

Prueba de Tukey para raíz en tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjuntos para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|-------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Tratamiento 3 | 3 | ,7767 | |
| Tratamiento 4 | 3 | ,8567 | ,8567 |
| Tratamiento 1 | 3 | ,9200 | ,9200 |
| Tratamiento 2 | 3 | ,9500 | ,9500 |
| Control | 3 | | 1,0133 |
| Sig. | | ,128 | ,187 |

Apéndice 15

Prueba de Tukey para Fósforo en tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjuntos para alfa = 0,05 | |
|---------------|---|-------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Tratamiento 3 | 3 | 4,2000 | |
| Tratamiento 4 | 3 | 4,5000 | |
| Tratamiento 2 | 3 | 4,6000 | |
| Control | 3 | 5,1000 | 5,1000 |
| Tratamiento 1 | 3 | | 6,2000 |
| Sig. | | ,126 | ,050 |

Apéndice 16

Prueba de Tukey para el Factor de Traslocación (FT) de tarwi

HSD de Tukey^a

| Tratamientos | N | Subconjunto para alfa = 0,05 |
|---------------|---|------------------------------|
| | | 1 |
| Tratamiento 2 | 3 | ,7967 |
| Control | 3 | ,8267 |
| Tratamiento 4 | 3 | ,8967 |
| Tratamiento 1 | 3 | ,9500 |
| Tratamiento 3 | 3 | 1,1467 |
| Sig. | | ,100 |

Apéndice 17

Protocolo de ensayo para Plomo (Pb)

Plomo

No. del programa

3



| | |
|--------------------|------------------------------|
| WTW Modelo No.: | 09717 |
| Categoría: | RT (ensayo de reactivos) |
| Cubeta: | 16 mm |
| Rango de medición: | 0,02 - 5,00 mg/l Pb |
| | Indicación posible en mmol/l |

Observación: Antes de ejecutar por primera vez, determinar el valor en blanco del reactivo.

Verificar el valor pH de la muestra.
Rango nominal: pH 3-6.
En caso necesario, corregir con ácido nítrico diluido o bien, con una solución de amoníaco.

Agregar 0,50 ml de **Pb-1** en la cubeta vacía con una pipeta.

Agregar 0,50 ml **Pb-2** con una pipeta y mezclar.

Añadir 8,0 ml de la muestra con la pipeta, cerrar la cubeta con el tapón roscado y mezclar.

Colocar la cubeta en el compartimiento del fotómetro e iniciar la medición.

Observaciones:

- Recomendamos, por cada paquete abierto de un juego de ensayos, determinar el nuevo valor en blanco de reactivos (agua desionizada, en lugar de la muestra).
- Vea más detalles en el papel Informativo en el empaque del test.

Figura 13. Protocolo de ensayo para Plomo.

Apéndice 18

Protocolo de ensayo de Fósforo (P)

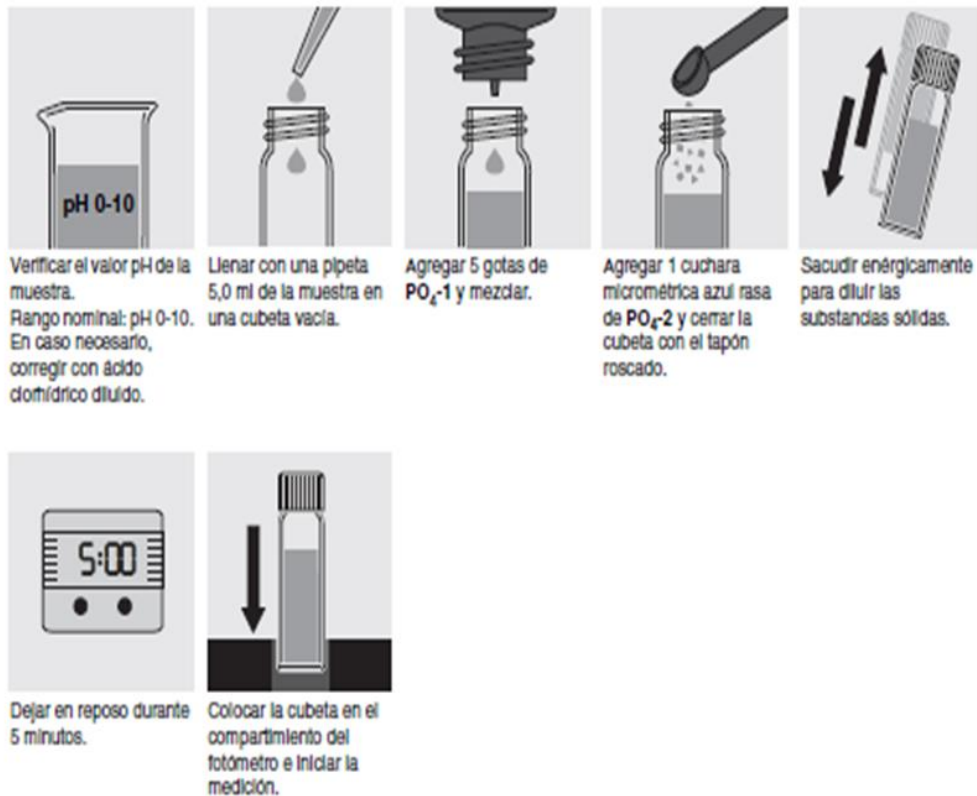
Fosfato

No. del programa

23



| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| WTW Modelo No.: | 14848 |
| Categoría: | RT (ensayo de reactivos) |
| Cubeta: | 16 mm |
| Rango de medición: | 0.05 - 3.00 mg/l PO ₄ -P |
| | 0.15 - 9.20 mg/l PO ₄ |
| | Indicación posible en mmol/l |



Observaciones:

- Recomendamos, por cada paquete abierto de un juego de ensayos, determinar el nuevo valor en blanco de reactivos (agua desionizada, en lugar de la muestra).
- Este ensayo cubre únicamente el ortofosfato.
- Vea más detalles en el papel informativo en el empaque del test.

Figura 14. Protocolo de ensayo de Fósforo.

Apéndice 19

Registro fotográfico de la investigación



Figura 15. Colocación de la semilla de tarwi en suelo contaminado con plomo.



Figura 16. Colocación de la solución nutritiva en los tratamientos.



Figura 17. Masetas con semillas de haba y tarwi después de 14 días.



Figura 18. Masetas con semillas de haba y tarwi después de 21 días.



Figura 19. Masetas con semillas de haba y tarwi después de 40 días.



Figura 20. Masetas con semillas de haba y tarwi después de 60 días.



Figura 21. Pasaje de la muestra de suelo y adición de HNO_3 para su análisis.



Figura 22. Muestras de suelo de haba y tarwi para su análisis.



Figura 23. Muestras listas para ser analizadas por el fotómetro.