

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA**



Capacidad fitorremediadora de la “alfalfa” *Medicago sativa* L. en  
suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de  
crecimiento, Végueta, Huaura

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORA**

María Engracia Mendoza Segura

**ASESOR**

Honorio Eloy Munive Jáuregui

Huaura, Perú

2020

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 019 - 2021/UCSS/FIA/DI

Siendo las 10:00 a. m. del día 27 de abril de 2021 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- |                                   |                 |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Segundo Octavio Zegarra Aliaga | presidente      |
| 2. Wilfredo Mendoza Caballero     | primer Miembro  |
| 3. Alejandro Ruiz Janje           | segundo Miembro |
| 4. Honorio Eloy Munive Jáuregui   | asesor          |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Capacidad fitorremediadora de la "alfalfa" *Medicago sativa* L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huaura** que presenta la bachiller en Ciencias Ambientales, **María Engracia Mendoza Segura** 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

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** 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, 27 de abril de 2021.



Segundo Octavio Zegarra Aliaga  
PRESIDENTE



Wilfredo Mendoza Caballero  
1° MIEMBRO



Alejandro Ruiz Janje  
2° MIEMBRO



Honorio Eloy Munive Jáuregui  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

A Dios que es mi guía espiritual, quien me protege y permite lograr los objetivos y las metas que me he trazado a lo largo de mi vida.

A mis padres: Miguel Mendoza Estrada y Eulalia María Segura Minaya, por el amor más puro que como padres me brindaron siempre, por sus consejos y apoyo incondicional para culminar mi carrera profesional tal como soñé y se los prometí. Gracias por todo.

A mis hermanos Miguel Aurelio Mendoza Segura y Jordan Smit Mendoza Segura, con mucho cariño y afecto, de siempre.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial al Dr. Honorio Eloy Munive Jáuregui, mi asesor, quién me acompañó en todo el proceso de elaboración, ejecución y culminación de esta investigación. Agradecerle también por sus consejos, su apoyo y dedicación para el desarrollo de mi trabajo de tesis.

Al Programa Nacional de Becas y Créditos Educativos (PRONABEC) – Beca 18, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, gracias al soporte logístico que me brindaron.

A mi promoción 2018-II-FIAH/UCSS, Filial Huaura: Végueta, quienes estuvieron conmigo desde mis inicios como estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental. De manera especial a Diana Jaramillo, Marita Ventocilla, María Acero, Lizbeth Ugarte, Ashley Vega, César Takahashi, Aarón Hoyos y Rhoydi Quiroz, por la amistad y el apoyo brindados durante los cinco años de nuestra etapa universitaria.

Al Blgo. Armando Chiclla Salazar, Ing. Elvira Castañeda Chirre, Lic. Luis Santisteban Portal, Sayra Raymundo, Greysi Montero, Fran Ibarra, Fredy Pajuelo y a todo el personal administrativo y de campo de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae por el apoyo durante la etapa de ejecución de mi trabajo de investigación.

Agradezco muy especialmente a mi tía Santa Reynalte Minaya y a su esposo Henry Ramírez, de igual manera al Psicólogo Ronald Caldas por sus consejos y por el apoyo para lograr una de mis metas, ser profesional.

Agradezco de manera muy especial a Jesús Fernando Wong Carranza y a toda su familia por el apoyo, la amistad, el amor y consejos que me brindan desde el primer día que me permitieron formar parte de su familia.

# ÍNDICE GENERAL

|  | Pág. |
|--|------|
| Índice general .....   | iv   |
| Índice de Tablas.....  | vi   |
| Índice de Figuras .....                                      | viii |
| Índice de Apéndices.....                                     | ix   |
| Resumen .....  | x    |
| Abstract.....  | xi   |
| Introducción.....  | 1    |
| Objetivos.....   | 3    |
| CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....                              | 4    |
| 1.1. Antecedentes .....                                      | 4    |
| 1.2. Bases teóricas especializadas .....                     | 11   |
| 1.2.1. Alfalfa.....  | 11   |
| 1.2.2. Morfología de la alfalfa .....                        | 12   |
| 1.2.3. Contaminación ambiental.....                          | 15   |
| 1.2.4. Tipos de contaminantes .....                          | 16   |
| 1.2.5. Contaminación del suelo .....                         | 17   |
| 1.2.6. Parámetros químicos del suelo .....                   | 18   |
| 1.2.7. Metales pesados.....                                  | 24   |
| 1.2.8. Efecto de los metales pesados en el suelo .....       | 25   |
| 1.2.9. Movilización de los metales pesados en el suelo ..... | 26   |
| 1.2.10. Acumulación de metales pesados en las plantas .....  | 27   |
| 1.2.11. Tolerancia de las plantas a metales pesados.....     | 28   |
| 1.2.12. Plomo.....   | 28   |
| 1.2.13. Efecto del plomo sobre el ambiente .....             | 29   |
| 1.2.14. Efecto fisiológico del plomo en las plantas.....     | 30   |
| 1.2.15. Efecto del plomo en la salud .....                   | 31   |
| 1.2.16. Fitorremediación .....                               | 33   |
| 1.2.17. Fases de la fitorremediación.....                    | 35   |
| 1.2.18. Ventajas y limitaciones de la fitorremediación ..... | 36   |
| 1.2.19. Plantas utilizadas en la fitorremediación.....       | 36   |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.2.20. Técnicas de cuantificación de metales pesados.....                                | 37        |
| 1.2.21. Factores de concentración .....   | 37        |
| 1.2.22. Estándares de calidad ambiental.....  | 39        |
| <b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>  | <b>41</b> |
| 2.1. Diseño de la investigación .....   | 41        |
| 2.1.1. Lugar y fecha.....   | 41        |
| 2.1.2. Técnicas instrumentales .....  | 41        |
| 2.1.3. Descripción del experimento.....   | 42        |
| 2.1.4. Tratamientos en estudio.....   | 45        |
| 2.1.5. Unidades experimentales.....   | 46        |
| 2.1.6. Identificación de variables y su mensuración (metodología).....                    | 46        |
| 2.1.7. Diseño estadístico del experimento.....  | 48        |
| 2.1.8. Análisis estadístico de datos.....   | 48        |
| 2.1.9. Materiales .....   | 48        |
| <b>CAPÍTULO III: RESULTADOS .....</b>   | <b>50</b> |
| 3.1. Análisis de los suelos, altura de planta y contenido de materia seca.....            | 50        |
| 3.1.1. Reacción del suelo, conductividad eléctrica y materia orgánica.....                | 50        |
| 3.1.2. Altura y contenido de materia seca .....   | 50        |
| 3.2. Plomo absorbido por la alfalfa y remanente en el suelo a los 45 y 90 días.....       | 54        |
| 3.2.1. Plomo absorbido por la alfalfa y remanente en el suelo a los 45 días.....          | 55        |
| 3.2.2. Plomo absorbido por la alfalfa y remanente en el suelo a los 90 días.....          | 58        |
| 3.3. Factor de bioconcentración .....   | 61        |
| <b>CAPÍTULO IV: DISCUSIONES .....</b>   | <b>64</b> |
| 4.1. Análisis del sustrato (suelo), altura de planta y contenido de materia seca.....     | 64        |
| 4.2. Plomo absorbido por la alfalfa y remanente en el suelo a los 45 días y 90 días ..... | 67        |
| 4.3. Factor de bioconcentración.....  | 70        |
| <b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .....</b>   | <b>72</b> |
| <b>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>REFERENCIAS .....</b>  | <b>75</b> |
| <b>TERMINOLOGÍA .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>APÉNDICES .....</b>  | <b>88</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. <i>Estándares de calidad ambiental para suelos</i> .....   | 40   |
| Tabla 2. <i>Niveles de plomo y etapas de evaluación en días por tratamiento</i> .....   | 45   |
| Tabla 3. <i>Cantidades de plomo en forma de Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> consideradas en el estudio</i> .....                   | 46   |
| Tabla 4. <i>Distribución de las unidades experimentales</i> .....   | 46   |
| Tabla 5. <i>Identificación de las variables y su mensuración</i> .....  | 47   |
| Tabla 6. <i>Parámetros biométricos considerados adicionalmente</i> .....  | 47   |
| Tabla 7. <i>Esquema del análisis de la varianza</i> .....   | 48   |
| Tabla 8. <i>Resultados del análisis del sustrato</i> .....  | 49   |
| Tabla 9. <i>Análisis de varianza de la altura de planta (cm) a los 45 días</i> .....  | 51   |
| Tabla 10. <i>Prueba de significación de Duncan para la altura de planta a los 45 días</i> .....                                   | 51   |
| Tabla 11. <i>Análisis de varianza de la altura de plantas (cm) a los 90 días</i> .....  | 52   |
| Tabla 12. <i>Prueba de significación de Duncan para la altura de plantas a los 90 días</i> .....                                  | 52   |
| Tabla 13. <i>Análisis de varianza de la materia seca radicular (g) a los 90 días</i> .....  | 53   |
| Tabla 14. <i>Prueba de significación de Duncan para la materia seca radicular (g) a los 90 días</i> .....                         | 53   |
| Tabla 15. <i>Análisis de varianza de la materia del follaje (g) a los 90 días</i> .....   | 54   |
| Tabla 16. <i>Prueba de significación de Duncan para la materia seca del follaje a los 90 días</i> .....                           | 54   |
| Tabla 17. <i>Análisis de varianza de contenido Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 45 días</i> .....                      | 55   |
| Tabla 18. <i>Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 45 días</i> ..... | 56   |
| Tabla 19. <i>Análisis de variancia de contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 45 días</i> .....                     | 57   |
| Tabla 20. <i>Prueba de significación de Duncan para contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 45 días</i> .....       | 57   |
| Tabla 21. <i>Análisis de varianza del contenido de Pb en el suelo a los 45 días</i> .....   | 58   |
| Tabla 22. <i>Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb en el suelo a los 45 días</i> .....                        | 58   |
| Tabla 23. <i>Análisis de varianza del contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 90 días</i> ... 59                 | 59   |
| Tabla 24. <i>Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 90 días</i> ..... | 59   |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 25. <i>Análisis de varianza del contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 90 días.....</i>                   | 60 |
| Tabla 26. <i>Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 90 días.....</i>  | 60 |
| Tabla 27. <i>Análisis de varianza del contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el suelo a los 90 días.....</i>                  | 61 |
| Tabla 28. <i>Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el suelo a los 90 días.....</i> | 61 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| <i>Figura 1.</i> Morfología de la planta de alfalfa .....   | 14   |
| <i>Figura 2.</i> Esquema general del proceso de contaminación. ....                                       | 16   |
| <i>Figura 3.</i> Reacciones de sodificación en suelos ácidos, neutros y alcalinos.....                    | 23   |
| <i>Figura 4.</i> Vías de ingreso del plomo al organismo humano. ....                                      | 32   |
| <i>Figura 5.</i> Esquema del proceso de fitoextracción. ....  | 33   |
| <i>Figura 6.</i> Altura de planta a los 45 días. ....   | 51   |
| <i>Figura 7.</i> Altura de planta a los 90 días. ....   | 52   |
| <i>Figura 8.</i> Materia seca radicular a los 90 días.....  | 53   |
| <i>Figura 9.</i> Materia seca del follaje a los 90 días.....  | 54   |
| <i>Figura 10.</i> Pb contenido en el follaje (parte aérea) a los 45 días. ....                            | 55   |
| <i>Figura 11.</i> Contenido de Pb en la raíz a los 45 días.....   | 56   |
| <i>Figura 12.</i> Contenido de Pb en el suelo a los 45 días .....   | 57   |
| <i>Figura 13.</i> Contenido de Pb en la parte aérea a los 90 días.....                                    | 59   |
| <i>Figura 14.</i> Contenido de Pb en la raíz a los 90 días, según los tratamientos aplicados. ....        | 60   |
| <i>Figura 15.</i> Contenido de Pb en el suelo a los 90 días, según los tratamientos aplicado. ....        | 61   |
| <i>Figura 16.</i> Factores de bioconcentración del Pb en las partes radicular y aérea de la alfalfa ..... | 62   |
| <i>Figura 17.</i> Factor de translocación del Pb en las partes aérea y radicular de la alfalfa.....       | 62   |

## ÍNDICE DE APÉNDICES

|   | Pág. |
|---|------|
| Apéndice 1. Plano de ubicación del lugar de ejecución del proyecto .....                  | 88   |
| Apéndice 2. Tablas para la interpretación de los resultados del análisis de suelos .....  | 89   |
| Apéndice 3. Datos originales de la absorción del plomo por la alfalfa .....               | 91   |
| Apéndice 4. Datos originales de la lectura en el fotómetro del contenido de plomo .....   | 93   |
| Apéndice 5. Datos de altura (45 y 90 días) y peso de la materia seca.....                 | 95   |
| Apéndice 6. Factores de bioconcentración de acuerdo a la extracción del plomo .....       | 96   |
| Apéndice 7. Resultados del análisis del agua de riego .....                               | 97   |
| Apéndice 8. Fotografías del proceso de investigación en el campo y en el laboratorio..... | 98   |

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en un tinglado de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, ubicado en el centro poblado de Mazo, del distrito de Végueta, provincia de Huaura, con la finalidad de conocer la capacidad fitorremediadora de la “alfalfa” de suelos contaminados con 3 niveles de plomo (70, 140 y 210 mg.kg<sup>-1</sup>) más 1 testigo (0 mg.kg<sup>-1</sup>) en un ensayo en macetas evaluadas a los 45 y 90 días, bajo un diseño de bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones, con un total de 12 unidades experimentales. Las medias de los tratamientos fueron sometidas a la prueba de significación de Duncan.

Luego de efectuarse las evaluaciones de los resultados tanto en campo como en laboratorio, con referencia al plomo absorbido por la “alfalfa”, se encontró que la extracción fue mayor por las raíces y en menor cantidad por la parte aérea de la planta tanto a los 45 como a los 90 días. El plomo remanente en el suelo fue más alto a los 45 días y más bajo a los 90 días con una mayor concentración en los tratamientos que recibieron 210 mg.kg<sup>-1</sup> de plomo. Finalmente, se llegó a las siguientes conclusiones: el pH es variable y corresponde a suelos ligeramente básicos, la textura es gruesa y la materia orgánica está entre baja a media, la salinidad es media, características que no facilitan el movimiento y disponibilidad de los metales pesados. La altura de plantas fue afectada ligeramente por las mayores concentraciones de plomo. Además, el factor de concentración de la parte aérea y la parte radicular dieron valores menores de uno determinando que la “alfalfa” es una planta exclusora del plomo. Asimismo, el factor de translocación con valores menores de uno calificó a la “alfalfa” como una planta fito-estabilizadora.

*Palabras clave:* Fitorremediación de la alfalfa, contaminación con plomo, ciclos biogeoquímicos, fitodisponibilidad, índice de biocentración.

## ABSTRACT

The present work was developed in a shed of the Faculty of Agricultural Engineering of the Universidad Católica Sedes Sapientiae, located in the town of Mazo, in the district of Végueta, province of Huaura, in order to know the phytoremediation capacity of the “alfalfa” of soils contaminated with 3 levels of lead (70, 140 and 210 mg.kg<sup>-1</sup>) plus 1 control (0 mg.kg<sup>-1</sup>) in a test in pots evaluated at 45 and 90 days, under a block design completely randomized with three repetitions, with a total of 12 experimental units. The treatment means were subjected to Duncan's significance test.

After carrying out the evaluations of the results both in the field and in the laboratory, with reference to the lead absorbed by the "alfalfa", it was found that the extraction was greater by the roots and to a lesser extent by the aerial part of the plant both at the 45 to 90 days. The remaining lead in the soil was highest at 45 days and lowest at 90 days with a higher concentration in the treatments that received 210 mg.kg<sup>-1</sup> of lead. Finally, the following conclusions were reached: the pH is variable and corresponds to slightly basic soils, the texture is coarse, and the organic matter is low to medium, the salinity is medium, characteristics that do not facilitate the movement and availability of metals. heavy. Plant height was slightly affected by higher concentrations of lead. In addition, the concentration factor of the aerial part and the root part gave values lower than one, determining that “alfalfa” is a lead-exclusive plant. Likewise, the translocation factor with values lower than one qualified “alfalfa” as a phyto stabilizer plant.

*Keywords:* Phytoremediation of “alfalfa”, lead contamination, biogeochemical cycles, Phyto availability, bioconcentration index.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo es un fenómeno que no se manifiesta en el corto plazo (Prieto *et al.*, 2009). Existe una serie de compuestos orgánicos e inorgánicos considerados como contaminantes del suelo que afectan al equilibrio de los ecosistemas en general y dentro de ellos resalta el plomo (Pb), el cual es un metal pesado. La exposición frecuente a este metal en los seres humanos causa diferentes enfermedades entre las que destaca el saturnismo, plumbosis o plumbemia, produciendo envenenamiento por la ingesta o la inhalación de sustancias que contienen plomo (Labanda y Fernández, 2012). Muchas actividades realizadas por el hombre (Antrópica), incluyendo la combustión de nafta con plomo y la actividad industrial y minera, emiten al ambiente materiales tóxicos. Dentro de ellos, los metales pesados tales como plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As) y cromo (Cr) que en muchos casos se encuentran en la atmósfera como materiales suspendidos que se respiran continuamente, causando una serie de efectos negativos para la salud humana y para la mayoría de las formas de vida porque son altamente tóxicos.

Al no descomponerse por procesos químicos ni biológicos, los metales pesados incrementan su peligrosidad y a la vez tienen la capacidad de permanencia en el medio ambiente por varias centurias, por lo tanto, mediante la bioacumulación, la concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos en cadena secuencial. En muchos países incluyendo el Perú, las medidas para evitar que el suelo, agua y aire se contaminen son necesarias tanto así como también la recuperación del medio ambiente deteriorado (Banco Mundial, 2006). La fitorremediación significa la alternativa que es tomada en cuenta por los estudiosos del suelo, ya que está demostrado en base a diversos resultados, que las plantas potencialmente son importantes en el mejoramiento de la calidad del suelo, evitando la degradación e inmovilizando a los diversos contaminantes como es el caso de los minerales pesados (Bonilla, 2013).

Los suelos de la sierra, así como también de la costa están irrigados con aguas contaminadas provenientes de los canales que sirven a las plantas metalúrgicas o a la extracción minera (Solano, 2005). Estas aguas contienen metales pesados como cadmio, cobre, níquel, plomo

y zinc; aumentando la contaminación edáfica. Por ello, la importancia de este trabajo radica en utilizar a la “alfalfa” *Medicago sativa* L. como especie fitorremediadora para determinar si tiene la capacidad de absorber los contaminantes metálicos, especialmente plomo, en cualquiera de sus órganos (raíz, tallo, hojas y frutos). Asimismo, la fitorremediación al ser comparada con las prácticas tradicionales para el mejoramiento de áreas con problemas a causa de la contaminación, han demostrado ser más ventajosas especialmente por ser menos costosa y poseer una capacidad de regeneración de las superficies afectadas y además porque tiene la posibilidad extraer selectivamente a los metales pesados mediante los procesos de desarrollo de las plantas. En este estudio se dará a conocer la capacidad de remediación de la “alfalfa” *Medicago sativa* para recuperar suelos potencialmente agrícolas o que eran productivos y que por consecuencia de la contaminación por plomo dejan de poseer estas propiedades.

La razón es la protección del medio ambiente y la salud humana de los efectos nocivos de la contaminación, generados por los metales pesados presentes en los suelos; esto se puede dar mediante la eficacia de las especies fitorremediadoras de estos metales, como es el caso de la “alfalfa”, como una medida correctiva ya que esta planta capta a los metales tóxicos en forma selectiva a través de sus raíces, pasando luego a formar parte de sus tallos y hojas. Por tal motivo en la presente investigación se tomó en cuenta las concentraciones del metal plomo absorbido tanto por la raíz, así como por la parte aérea de la planta, medida a los 45 y 90 días de crecimiento.

# OBJETIVOS

## Objetivo general

Determinar la capacidad fitorremediadora de la “alfalfa” *Medicago sativa* evaluada en dos etapas de crecimiento (45 y 90 días) en suelos contaminados con plomo en diferentes concentraciones en Végueta-Huaura.

## Objetivos específicos

- Conocer el efecto sobre la altura de plantas y el contenido de materia seca en el cultivo de la “alfalfa” como resultado de la aplicación del plomo en tres niveles (70, 140 y 210 mg de Pb.kg<sup>-1</sup>) más un testigo (0 mg de Pb.kg<sup>-1</sup>) en un ensayo en macetas.
- Determinar la cantidad de plomo absorbido por las raíces y la parte aérea de la “alfalfa” expuesta a diferentes concentraciones de suelos contaminados con plomo, evaluados a los 45 y 90 días.
- Calcular el factor de concentración del plomo absorbido por las raíces y parte aérea de la “alfalfa”, evaluados a los 45 y 90 días en los suelos en estudio, mediante de la obtención de los factores de bioconcentración y translocación.

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes

### Internacionales

Martell (2014) en el trabajo de investigación “Acumulación de metales pesados en *Beta vulgaris* L. y *Lolium perenne* L. en suelos de Cuernavaca”, llevada a cabo en la ciudad de México. El estudio tuvo como objetivo evaluar la capacidad de dos especies, “acelga” *Beta vulgaris* L. y “pasto perenne” *Lolium perenne* L. para acumular metales pesados, mediante la técnica de la fitorremediación. Para lo cual utilizó EDTA (Quelato llamado ácido etilendiaminatetraacético que forma complejos con los iones metálicos), para conocer si los niveles de solubilidad en el suelo de los elementos químicos se incrementaban y adquirirían una mayor disponibilidad. Las dos especies fueron estudiadas de la siguiente manera: Tratamiento (1) empleándose EDTA y tratamiento (2) sin EDTA, éste fue considerado como control (testigo). Las respuestas obtenidas para la “acelga”, con el tratamiento 1 (con EDTA) mostró una mayor cantidad de plomo con una acumulación en las raíces de  $681,66 \text{ mg.kg}^{-1}$ , seguido de cromo con  $350,16 \text{ mg.kg}^{-1}$ , cobre con  $90,75 \text{ mg.kg}^{-1}$ , níquel con  $48,75 \text{ mg.kg}^{-1}$ , cadmio con  $46 \text{ mg.kg}^{-1}$  y zinc con  $34,78 \text{ mg.kg}^{-1}$  y sin EDTA las concentraciones en raíz para plomo fueron de  $408,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ , cromo con  $253,05 \text{ mg.kg}^{-1}$ , cobre con  $65,08 \text{ mg.kg}^{-1}$  y zinc con  $52,64 \text{ mg.kg}^{-1}$ , con una mayor concentración en la parte aérea del zinc (Zn), níquel (Ni) y cadmio (Cd) con 56,74 y 22,75 miligramos por kilogramo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ), respectivamente. En “pasto” que fue tratado con ácido etilendiaminatetraacético (EDTA), el elemento de mayor concentración en las raíces fue el Pb, seguido del Cr luego el Zn, Ni, Cd y Cu con 467,5; 257,125; 65,05; 64,5; 55,75 y 40,6  $\text{mg.kg}^{-1}$ , respectivamente. En el tratamiento sin ácido etilendiaminatetraacético (EDTA) la mayor acumulación en las raíces fue del Pb, seguido por el Cr, el Zn que acumularon más en la parte aérea de la planta, seguido por Ni, Cd y finalmente Cu con 255; 218,4; 53,846; 43,2  $\text{mg.kg}^{-1}$ ; 23,16  $\text{mg.kg}^{-1}$  y 20,25 miligramos por kilogramo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ), respectivamente. Finalmente la altura que alcanzó la “acelga” fue entre 12 a 14 cm y la del “pasto” estuvo entre 29 y 35 cm, en los dos tratamientos, per

fue menor en el tratamiento con EDTA. Concluyó que las especies *Beta vulgaris* L. y *Lolium perenne* L. tuvieron la capacidad de acumular metales en los sistemas radiculares y actuaron como fitoestabilizadoras de metales pesados e hipereacumuladoras de zinc en suelos sin EDTA.

Raya (2014) en su tesis “Determinación de plomo en “alfalfa” *Medicago sativa* L., irrigada con aguas residuales”, ejecutada en el ejido Plan de San Luis, Torreón, Coahuila (México), tuvo como objetivo conocer la concentración de plomo en plantas de “alfalfa” establecidas en un suelo irrigado con aguas residuales, considerándose, además, la determinación de metales pesados en tres niveles de profundidad del suelo (0-30, 30-60 y 60-90 cm). El experimento fue analizado mediante el diseño de bloques al azar con 12 repeticiones haciendo uso de una parcela de 18 x 180 m de un área de 3 420 m<sup>2</sup>. La determinación del Pb, tanto en la parte vegetal como en el suelo, fue mediante el espectrofotómetro de absorción atómica. Dentro de los resultados, encontró una alta concentración de plomo en todos los tratamientos estudiados en cantidades entre 8,29 hasta 62,33 mg.kg<sup>-1</sup>, los mismos que superaron los niveles de 0,2 mg.kg<sup>-1</sup> señalados por el CODEX STAND-1989 (Norma Internacional sobre contaminantes, en este caso metales pesados) como límite. Del mismo modo, las cantidades de Pb encontrados en el suelo también fueron muy superiores a los señalados en norma anterior (cantidades superiores a 100 mg.kg<sup>-1</sup>). Los resultados encontrados indicaron que tanto el vegetal en estudio, así como los suelos en las tres profundidades tienen niveles altos de plomo, indicando que los alimentos que ingieren los animales, especialmente vacunos de leche, y los productos que estos producen, especialmente la leche, están contaminados con plomo. El autor concluyó que el consumo de la leche por la población podría ser la causa de muchos problemas de salud en la población, recomendado finalmente, la ejecución de estudios para conocer los niveles de sangre tanto en vacunos que consumieron la “alfalfa”, como en la población que consumió la leche producida por éstos.

Bonilla (2013) realizó un trabajo de investigación titulado “Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación” en Ponciano Alto, en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha (Ecuador), con el objetivo de hacer una evaluación de las especies vegetales “amaranto”

*Amaranthus hybridus* L., “acelga” *Beta vulgaris* y “alfalfa” *Medicago sativa*, con el fin de estudiar la capacidad fitorremediadora de esas especies en la absorción del Pb, bajo la metodología de espectrofotometría de absorción atómica con sistema de flama. Las semillas inicialmente se desarrollaron en semilleros para luego ser trasplantadas en un medio edáfico ya contaminado con plomo. Las plántulas de las tres especies fueron tratadas de la siguiente manera: (a) Bajo un medio controlado (invernadero) sin la aplicación de enmiendas orgánicas ni elementos nutritivos, y (b) Desarrollo de las plántulas a cargo de una institución especializada (Pilviza) en donde durante el crecimiento de las especies fueron aplicados abonos orgánicos y minerales. La determinación del contenido de plomo fue hecha mediante las mediciones en los tratamientos sin contaminación y en los suelos polucionados, el contenido de Pb fue medido en diferentes periodos de tiempo (0, 20, 45, 60 y 90 días) en los cuales estuvieron sometidas las plantas y finalmente fue analizado al suelo ya tratado con la fitorremediación. Los resultados mostraron que las tres variedades de plantas expuestas al abono orgánico durante la investigación presentaron mayor capacidad de absorción que las plantas que no recibieron ningún tipo de abono. El “amaranto” que fue sembrado en un suelo que recibió 2,5, 5,0 y 10,0 partes por peso (p/p) de plomo respectivamente, extrajo a los 30 días 8,2, 248,8 y 107,8 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb, respectivamente, mientras que a los 90 días extrajo 252,9, 82,0 y 50,1 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb, respectivamente. La “alfalfa” que fue cultivada en las mismas condiciones que el amaranto absorbió a los 30 días extrajo 52,4, 171,1 y 787,8 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb, respectivamente y a los 90 días 115,4, 278,9 y 426,0 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb, respectivamente. La “acelga” extrajo cantidades mucho más bajas tanto a los 30 como a los 90 días. El autor concluyó que de las especies estudiadas presentaban mayor acumulación de plomo en sus tejidos cuando fueron expuestas a suelos contaminados con este metal, destacando la “alfalfa” como una planta con mayor capacidad extractiva en suelos contaminados con plomo, seguida del “amaranto”.

Ortiz *et al.* (2009) realizaron una investigación sobre la “Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando “quelite” *Amaranthus hybridus* L. y “micorrizas”, en Lagunera (México)” (p. 1), con el objetivo de hacer una evaluación de los niveles de extracción del plomo y el cadmio por el “quelite” *Amaranthus hybridus* y correlación con la adición de una mezcla micorrítica arbuscular de las especies *Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *Glomus etunicatum* y *Glomus clarum* sobre un suelo con contenidos altos de Pb y Cd. El porcentaje de colonización de las micorrizas y la concentración de los

metales pesados tanto en las raíces así como en los tallos y hojas, fueron las principales variables consideradas en la investigación. Dos ensayos, uno por cada metal, con el diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones fueron desarrollados mediante el paquete de diseños experimentales FA-UANL, Versión 2.5” (p 26). “En el primero fueron adicionados tres cantidades de micorrizas (0, 2,5 y 5,0 g.kg<sup>-1</sup>) en suelos con 300 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb” (p. 27). “En el segundo experimento, las mismas cantidades de micorrizas fueron probadas en suelos contaminados con 15 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd” (pg. 27). “Las concentraciones de Pb y Cd en la raíz, hoja y tallo a fueron analizadas a los 65, 95 y 125 días de edad de la planta y determinadas con un espectrofotómetro de absorción atómica” (p. 27). “Los resultados sobre el plomo en hojas, tallos y raíces indicaron un aumentó con la edad al ser cultivada en un suelo contaminado con 300 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb, con y sin la adición de micorrizas y demostró capacidad extractora del Pb” (p. 28). “También fue observado que el “quelite” concentró más Pb en sus tejidos conforme fue incrementada la adición de micorrizas al sustrato en el rango de 0 a 5 g.kg<sup>-1</sup> de suelo, aunque las diferencias no fueron significativas ( $P \leq 0,05$ ) (p. 28). “Además, la concentración de Pb fue mayor en las hojas entre los 95 a 125 días y menor en los tallos y raíces entre los 65 a 95 días de edad. Concluyeron en que el efecto fitoextractante del Cd fue notorio a los “125 días de edad de la planta (75 días de la inoculación del “quelite” en simbiosis con micorrizas), en particular en la zona radicular” (p. 37). “Finalmente que el *Amarantus hybridus* L. tuvo la capacidad de bioconcentrar en sus tejidos los metales Pb y Cd conforme aumentó la edad de la planta” (p. 37).

Sierra (2006) en la tesis “Fitorremediación de un suelo contaminado con plomo por actividad industrial”, investigación realizada dentro del campus principal de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” de México, tuvo como objetivo de conocer la capacidad de remediación de la “alfalfa” con respecto a la presencia del plomo en el suelo. Los cinco tratamientos considerados en el experimento fueron distribuidos de acuerdo con un diseño experimental completamente al azar. Los cinco tratamientos considerados en el experimento fueron distribuidos de acuerdo con un diseño experimental completamente al azar. Las variables evaluadas fueron salinidad, acumulación de Pb en el tejido, porcentaje de sodio y Pb en el suelo. La metodología utilizada fue según lo que se indicaba en los protocolos de análisis en laboratorio. Dentro de los resultados obtenidos, encontró que la planta de “reygrass” *Lolium perenne* presentó mayor concentración de plomo en el tratamiento testigo con un valor de 2 438, 89 ug.g<sup>-1</sup>, esto posiblemente debido a que el tratamiento fue

desarrollado en contenidos más bajos de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (24) y con una conductividad eléctrica (C.E.) de 5,52 dS.m<sup>-1</sup>, que fueron encontrados después del experimento. En el tratamiento que tuvo la adición de la lombricomposta, la extracción del plomo fue de 1 544,54 ug.g<sup>-1</sup> con valores de PSI de 24 y de C.E. de 7,59 dS.m<sup>-1</sup> similares al testigo, en aquellos sustratos donde se agregó vidrio volcánico (perlita) y musgo (peat most), la extracción de Pb osciló de 558,16 a 1 104,90 ug.g<sup>-1</sup> respectivamente. Finalmente, el tratamiento 5 que estuvo compuesto por sustrato y estiércol, dio los valores más bajos en la remediación de los suelos con plomo cuyo extracción fue de 754,31 ug.g<sup>-1</sup> al igual que el tratamiento compuesto por solo peat most, probablemente debido a que los valores obtenidos de PSI (34,28) y C.E. (10,03 dS.m<sup>-1</sup>) fueron los más altos. Finalmente, concluyó que las concentraciones de Pb en tratamiento excedieron los límites máximos permisibles para suelos contaminados, agregándose que un tratamiento más prologando podría dar resultados mucho más concretos.

## Nacionales

Gonzales *et al.* (2018) realizaron un proyecto de investigación titulado “Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el uso del cultivo de la “alfalfa” *Medicago sativa*, llevada a cabo en la ciudad de Trujillo (Perú)”, con el objetivo de determinar el efecto fitorremediador de la “alfalfa” *Medicago sativa* en suelos contaminados con dos niveles de cobre (Cu). En la investigación utilizaron un diseño completamente al azar (DCA) considerándose cuatro bloques con 10 repeticiones para cada tratamiento. Un suelo franco arenoso contaminado con 0,53 g de CuSO<sub>4</sub>.kg<sup>-1</sup> (Tratamiento 1), y un suelo franco arenoso con 0,66 g de CuSO<sub>4</sub>.kg<sup>-1</sup> de suelo (Tratamiento 2), comparados con un testigo (Tratamiento 3) con 0 g de CuSO<sub>4</sub>. Los resultados obtenidos indicaron que la presencia del cobre después de dos meses del sembrado de la “alfalfa”, reduciéndose notablemente de la siguiente manera: en el Tratamiento 1 el cobre disminuyó de 278 mg.kg<sup>-1</sup> a 124 mg.kg<sup>-1</sup> y en el Tratamiento 2 de 293 mg.kg<sup>-1</sup> a 143 mg.kg<sup>-1</sup> de cobre, concluyendo de tal manera que la mayor acumulación de cobre se dio en la raíz (78 mg.kg<sup>-1</sup> en el Tratamiento 2) a diferencia del tallo (21 mg.kg<sup>-1</sup> en el Tratamiento 2), considerándose así a la “alfalfa” como una planta fitorremediadora.

Peixoto (2018) en su tesis “Rizofiltración de “alfalfa” *Medicago sativa* L. y “coliflor” *Brassica oleracea* var. *Brotrytis* L., para tratamiento de suelos contaminados con cadmio y plomo, ubicado en la parte alta de la microcuenca del río Parac en el centro poblado de San José de Parac (Huarochirí, Lima)” (p. 1); considerando como objetivo principal evaluar la aplicación del Método de Rizofiltración mediante el uso de las raíces para la absorción de contaminantes tóxicos con la finalidad de disminuir los niveles de contaminación con plomo (Pb) y cadmio (Cd) presentes en los suelos. La investigación fue no experimental, pero para la comparación de las medias obtenidas fue utilizada la Prueba de T- Student mediante el programa estadístico SPSS. El período del experimento fue de 2 a 3 meses, utilizándose a la “alfalfa” y la “coliflor”, con el fin de poder generar la absorción del Pb y el Cd en el proceso fenológico de las especies estudiadas. Los resultados indicaron que con el uso de dichas especies lograron disminuir niveles muy significativos de los contaminantes plomo y cadmio en los suelos. Para el contaminante plomo, la “alfalfa” logró una reducción de un 78 % (134,48 mg.kg<sup>-1</sup> a 30,16 mg.kg<sup>-1</sup>) y la “coliflor” de un 85 % (134,48 mg.kg<sup>-1</sup> a 20,22 mg.kg<sup>-1</sup>). Mientras que, para el cadmio, la reducción con la “alfalfa” fue de 49 % (1,51 mg.kg<sup>-1</sup> a 0,77 mg.kg<sup>-1</sup>) y 47 % (1,51 mg.kg<sup>-1</sup> a 0,8 mg.kg<sup>-1</sup>) con la “coliflor”. Concluyó que en comparación con otras especies como el “girasol”, la “alfalfa” y la “coliflor” fueron más eficientes, ya que lograron reducir los niveles contaminantes hasta por debajo de los estándares de calidad ambiental (ECA’s) donde el valor máximo para suelos agrícolas fue de 70 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb.

Palacios (2016) en su tesis “Evaluación de la capacidad fitoextratora de la “alfalfa” *Medicago sativa* y el “perejil” *Petroselinum crispum* en la remediación de suelos contaminados por plomo en el distrito de Anta, Carhuaz (Perú)” (p. 1). El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar la capacidad fitoextratora de la “alfalfa” y del “perejil” *Petroselinum crispum* Mill Nyman en la remoción de plomo (Pb) de los suelos contaminados por plomo. La población en estudio estuvo constituida por los suelos contaminados con plomo, metal presente en las aguas del río Santa que fueron usadas para el regadío de las parcelas ubicadas en ese distrito, usándose para el estudio una porción de 250 g de suelo como muestra representativa. Los resultados obtenidos indicaron una reducción del contaminante plomo después del sembrado de las especies, el cultivo de “alfalfa” tuvo como resultado una extracción de 111 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb a comparación del “perejil” que obtuvo una menor extracción de Pb equivalente a 84 mg.kg<sup>-1</sup>, donde el suelo

inicial para ambas especies fue de  $196 \text{ mg.kg}^{-1}$  de Pb. Los datos indicaron que el cultivo de “alfalfa” ayuda a reducir los niveles de concentración del contaminante plomo a diferencia del perejil que tiene una menor capacidad fitoextractora. El autor concluyó que los cultivos de las dos especies brindan resultados favorables para la remediación de los suelos contaminados con plomo.

Chávez (2014) realizó un trabajo de investigación titulada “Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo”, con el objetivo de comparar el potencial fitorremediador de dos especies pertenecientes de los géneros *Calamagrostis* y *Nicotiana* en suelos provenientes de la ciudad de La Oroya y del el lago Junín (departamentos de Cerro de Pasco y Junín - Perú), cultivados bajo tres niveles de plomo ( $700$ ,  $1\ 000$  y  $1\ 200 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), debido a su elevada concentración de plomo encontrada en campo. El estudio fue realizado en invernadero, durante 60 días en el laboratorio de suelos de la Universidad Agraria - Lima. bajo un diseño factorial  $3^2$  con 9 tratamientos y tres repeticiones con un significación de  $p \leq 0,01$ , Los análisis estadísticos y la comprobación de las incógnitas del modelo y la conversión de los datos obtenidos fueron realizados con la ayuda del software libre R. Los resultados conseguidos indicaron que la planta de *Calamagrostis* mostró una capacidad fitorremediadora de  $299,8 \text{ mg.kg}^{-1}$  en la zona radicular y  $48,4 \text{ mg.kg}^{-1}$  en la zona aérea, seguido de la *Nicotiana* con  $276,7 \text{ mg.kg}^{-1}$  zona radicular y  $96,5 \text{ mg.kg}^{-1}$  zona aérea, con respecto a *Vetiver* el valor de fitorremediación fue el más bajo con  $93,5 \text{ mg.kg}^{-1}$  en la zona radicular y  $15,6 \text{ mg.kg}^{-1}$  en la zona aérea. El análisis estadístico de datos mostró diferencias significativas en el factor de translocación alcanzado por las distintas especies, siendo el *Vetiver* (0,14) el que tuvo significancia en comparación con las otras dos especies *Calamagrostis* (0,31) y *Nicotiana* (0,39). La autora concluyó que la *Nicotiana* tuvo un mejor potencial de fitorremediación por su elevada concentración de biomasa ( $276,7 \text{ mg.kg}^{-1}$  en la zona radicular y  $96,5 \text{ mg.kg}^{-1}$  en zona aérea) y reconoció la capacidad natural de translocar el metal hacia las partes aéreas e inmovilizarlo en las raíces, siendo, además, una especie con adaptación positiva a diferentes variaciones climáticas, corroborando el enunciado en el sentido de que las especies oriundas son las más seguras para investigar la fitorremediación las áreas inalteradas.

## **Regionales**

Ventocilla (2015) ejecutó un trabajo de investigación titulada “Clasificación de la fertilidad de los suelos del predio “Fundo Nuevo” por el método de capacidad-fertilidad de Végueta-Huaura”, cuyo objetivo fue clasificar los suelos del predio “Fundo Nuevo” en el centro poblado de Medio Mundo, distrito de Végueta, Huaura, Perú”. Por el método propuesto por Sánchez *et al.* 2003, basado en la evaluación de los tipos (textura de la capa arable y textura de la capa subyacente) y de los modificadores relacionados con las propiedades físicas del suelo (anegamiento, estación seca, régimen de humedad, bajas temperaturas, presencia de gravas, pendiente, riesgo de erosión, escasa profundidad), modificadores relacionados con la reacción del suelo (arcillas, toxicidad del aluminio, limitaciones químicas, calcáreo, salinidad, alcalinidad), modificadores relacionados con las propiedades mineralógicas del suelo (reservas de nutrientes, fijación del fósforo, material volcánico, arcillas expandibles, potencial de lixiviación y minerales intemperizables) y propiedades relacionados con las propiedades biológicas del suelo (saturación en el contenido de carbono orgánico). Después de la caracterización de los suelos en estudio, los resultados obtenidos mostraron que los suelos fueron muy superficiales y gravosos, con una baja aptitud agrológica y con pH moderadamente básicos, de clase textural arenosa a arena franca, con contenidos muy bajos de materia orgánica, fósforo disponible de medio a alto y potasio disponible de bajo a medio, con baja a muy baja capacidad de intercambio catiónico y con riesgo moderado de erosión y de lavaje o lixiviación. La autora concluyó que los niveles de fertilidad-capacidad fueron de muy baja a baja fertilidad, con severas limitaciones químicas debido a la presencia de carbonatos que produjeron la fijación de fósforo y en algunos casos también hubo riesgo de salinidad, porque no hicieron un buen uso y manejo de los fertilizantes y del agua de riego.

### **1.2. Bases teóricas especializadas**

#### **1.2.1. Alfalfa**

La “alfalfa” *Medicago sativa* L. es una planta herbácea perenne con un promedio de vida de 5 a 7 años. Esta especie tiene la capacidad de fijar nitrógeno y fósforo en el suelo, siendo tolerante a temperaturas de hasta 10 a 15 °C bajo cero, pero prospera mejor a “temperaturas medias anuales de 15 °C. Es tolerante a la sequía, pero muy susceptible al agua en exceso y

suelos ácidos con pH por debajo de 6,4” (p. 32) no permite el desarrollo normal de esta planta (Soriano, 2003).

Según León (2016) la clasificación taxonómica de la alfalfa es la siguiente:

|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| Reino:      | Plantae                   |
| División:   | Magnoliophyta             |
| Clase:      | Magnoliopsida             |
| Subclase:   | Rosidae                   |
| Orden:      | Fabales                   |
| Familia:    | Fabaceae                  |
| Subfamilia: | Faboideae                 |
| Tribu:      | Trifolieae                |
| Género:     | <i>Medicago</i>           |
| Especie:    | <i>Medicago sativa</i> L. |

### 1.2.2. Morfología de la “alfalfa”

Morfológicamente según Soriano (2003), la planta de la “alfalfa” está conformada de la siguiente manera:

#### **Raíz**

La “alfalfa” tiene raíces abundantes y profundas con una principal muy robusta y penetrante rodeada de muchas raicillas secundarias. La raíz principal tiene la capacidad de penetrar profundamente en relación con las otras herbáceas cultivables. Soriano (2003, p. 19) agrega lo siguiente:

La “alfalfa” en su estado joven posee una raíz principal de tipo pivotante que puede penetrar con facilidad y llegando a crecer y alcanzar los niveles freáticos o también llegar hasta el material madre subyacente a distancias significativas. Una planta de “alfalfa” en sus inicios (un año) se desarrolla en un espacio de 0,90 m de diámetro llegando hasta más de 2 m de profundidad. En el segundo año penetra entre 7,5 a 9,0 m o algo más. Las raíces pivotantes que tienen un diámetro entre 2 a 3 cm no desarrollan muchas raíces secundarias en la parte superficial de la capa arable del suelo, pero pueden extenderse lateralmente penetrando a mayor profundidad, en forma paralela a la raíz principal. Las raíces secundarias son muy limitadas en

cantidad, por esta razón la raíz principal es la parte más importante del sistema radicular de la “alfalfa”.

### **Tallo**

Según Soriano (2003) los tallos de la “alfalfa” son herbáceos, delgados, erectos y muy ramificados que pueden alcanzar una altura variable entre los “60 hasta los 90 cm” (p. 19). El tallo principal se origina en las axilas de los cotiledones en el proceso de germinación, y cuando éstos desaparecen de las hojas inferiores, se producen yemas que posteriormente dan origen a nuevos tallos (p.19). Los “nuevos tallos” empiezan “a desarrollarse” al inicio del “verano”, “mientras que los tallos viejos se lignifican, endurecen y mueren” (p. 19). “Todos estos tallos viejos o nuevos forman un conjunto que recibe el nombre de corona, fracción fundamental de la planta de” “alfalfa” (p. 19). “Las variedades adaptadas a climas cálidos presentan” normalmente “20 coronas sobre la superficie del” sustrato; no siendo igual a temperaturas bajas, “donde la corona aparece bien por debajo de dicho nivel” (p. 19). Puede haber una cantidad de “5 a 25 o más tallos”.

### **Hojas**

En la “alfalfa” “las primeras hojas verdaderas” que aparecen “después de los cotiledones son unifoliadas”. Luego estas “hojas son” llamadas hojas normales que se caracterizan por ser “trifoliadas, pecioladas, con folíolos” peciolados, particularmente el central (p. 20). Estos “folíolos” se desarrollan en “distintas formas más o menos oblongas y ovalado-oblongas”, dentadas “hacia sus ápices con escasas estipulas” con una “forma” parecida a una “lezna” adherida al “pecíolo” (p.20). “El pecíolo es” parecido a “un pequeño tallo que une al raquis” con el resto de la planta (p. 20). “Los folíolos” son parecidos a “pequeñas hojas” y en “conjunto forman la hoja propiamente dicha” (p. 20). “El haz o cara superior de los folíolos” adquieren “un color verde más intenso”, muy al contrario del envés o cara inferior que generalmente es más pubescente y nervaduras mucho más pronunciadas (Morua, 1997).

### **Flor**

Las flores de la “alfalfa” están agrupadas en “racimos axilares” de distintos tamaños y densidades (p. 20). “La primera inflorescencia” nace en el “nudo catorce” y “tiene un color violeta con distintas tonalidades que van del azul pálido al morado oscuro”, aunque “otras especies de *Medicago* pueden” tener “flores” de “color amarillo” (p. 20). Los híbridos tienen

flores” variadas “que suelen ser violetas cuando están en capullo, verdes al abrirse y luego amarillas o casi blancas al madurar” (p. 20).

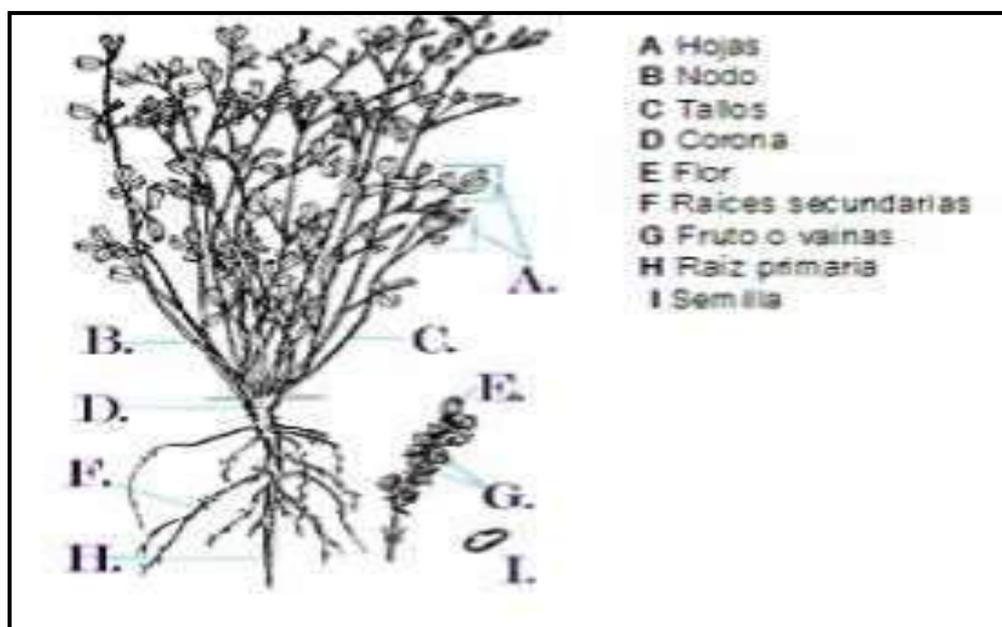
### **Semilla**

Las semillas de la “alfalfa” tienen una forma ovalada o adoptando una forma arriñonada y con un aspecto de comba en diversas formas; exhibiendo una marca a manera de una cicatriz ubicada en un extremo en la semilla o en una incisión bien definida cerca de la mitad en las semillas de forma de riñón. La semilla de “alfalfa” tiene un color amarillo verdoso a café claro y con una longitud de 1,5 mm a más (Robles, 1985).

### **Fruto**

Es una vaina curvada de color café con 3 o 4 espirales, ligeramente pubescentes cuando llega a la madurez, conteniendo varias semillas arriñonadas. El proceso de la dehiscencia es producido en la sutura dorsal y/o ventral de las vainas y ocurre de manera pasiva, o bien activa. Al abrirse la vaina (legumbre) en sus dos componentes (valvas), ocurre un movimiento por el que estas se separan, dejando las semillas en libertad (Pozo, 1977).

La morfología de la “alfalfa” que fueron mencionadas líneas arriba se puede observar gráficamente en la Figura 1.



*Figura 1. Morfología de la planta de “alfalfa”. Fuente: Barrera (2005).*

### **1.2.3. Contaminación ambiental**

Hoy en día en pleno siglo XXI el problema que más afecta a la sociedad es la contaminación ambiental, obteniendo como resultado el incremento de la pérdida de la calidad del agua, del aire y de los suelos utilizados para las labores agrícolas (Reyes *et al.*, 2016). Según el Ministerio del Ambiente [MINAM] (2016) el deterioro medio ambiental se produce por la incorporación al ambiente de diversos compuestos físicos, químicos o biológicos al igual que una mezcla de estos compuestos en diversas zonas adoptando tamaños y magnitudes con capacidad de convertirse en agentes nocivos para la salud, la seguridad o para la seguridad de los seres humanos y que a su vez afecten la sobrevivencia de la fauna y la flora o impidiendo el acceso sin restricciones a los lugares destinados para las actividades recreativas y de esparcimiento.

La contaminación ambiental es también el resultados de diversas acciones realizadas por el hombre que so causantes de la incorporación de diversos tipos de contaminación al ambiente sobrepasando los niveles y/o proporciones tolerables, si tomar en cuenta que estos materiales nocivos tienen la tendencia a acumularse o tener un efecto sinérgico por tener la condición de ser los que producen la contaminación del ambiente.

Encinas (2011) explica que la contaminación ambiental es la presencia de sustancias no deseables en el aire, agua o suelo que pueden encontrarse en diferentes concentraciones, afectando a la salud y al bienestar de las personas. Encinas (2011) menciona a la vez que para ser considerado un contaminante este tiene que causar algún efecto negativo en un medio determinado o en algunos de los vectores ambientales (aire, agua o suelo), de lo contrario no se consideraría que el medio está contaminando, deduciendo así que no hay presencia de ningún contaminante en dicho lugar.

Las fuentes de origen de los contaminantes son de carácter natural o artificial (Figura 2). Los artificiales se clasifican en: (a) Fijas o estacionarias: contaminación industrial, o (b) Móviles: contaminación producida por el parque automotor (tráfico). Todo elemento contaminante que es producido por una fuente causa una contaminación primaria y son propagados la

velocidad que impulsa la fuente de origen, por lo tanto, disponen de una peso (masa) en función a un periodo de tiempo. Los contaminantes al ser emitidos al medio sufren una serie de procesos, no solo de transporte y de dispersión, sino también de reacciones químicas, adquiriendo la categoría de contaminantes secundarios (Encinas, 2011).

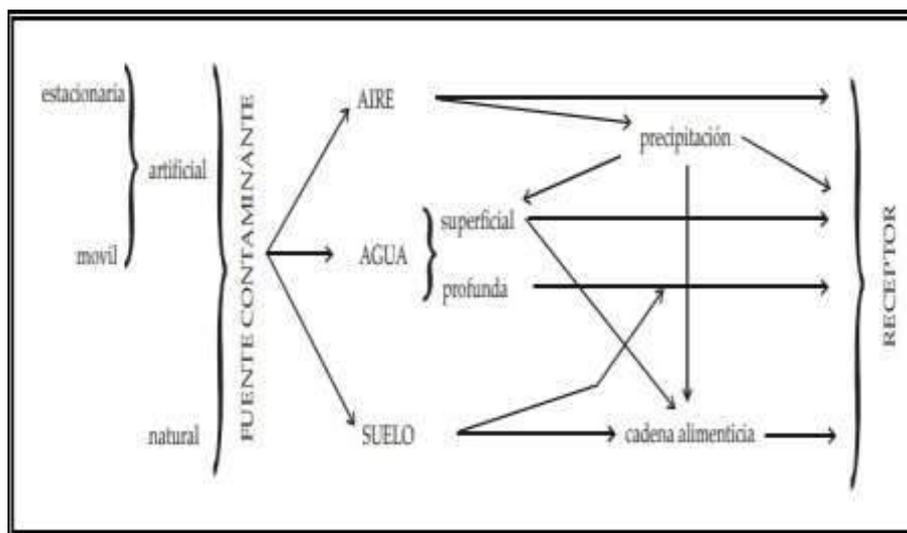


Figura 2. Esquema general del proceso de contaminación. Fuente: Encinas (2011).

#### 1.2.4. Tipos de contaminantes

Los tipos de contaminantes químicos se dividen de la siguiente manera:

##### Contaminantes inorgánicos

En este grupo de contaminantes se encuentran los metales pesados como cobalto (Co), plomo (Pb), cromo (Cr) o cobre (Cu), elementos no metálicos como el arsénico (As) y boro (B), y radionúclidos como  $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$  (cesio). Algunos elementos traza son esenciales para la nutrición y crecimiento de plantas (B, Cu, Fe, Mg y Zn) y animales (As, Cu, Co, Fe, Mg, Zn, Cr, Ni, Mn, Se y Sn). La toxicidad de estos elementos químicos depende de la concentración, la forma química y su persistencia (Delgadillo *et al.*, 2011).

##### Contaminantes orgánicos

Dentro de estos contaminantes están los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's o HAP's, por sus siglas en inglés), dioxinas, hidrocarburos de petróleo, disolventes clorados, compuestos aromáticos que son utilizados para la producción de pigmentos, residuos de la fabricación de explosivos, fármacos, plaguicidas, entre otros productos. A diferencia de los

compuestos inorgánicos, estos componentes son considerados como menos dañinos para las plantas por los bajos niveles tóxicos y son menos reactivos porque se almacenan en menores proporciones (Delgadillo *et al.*, 2011).

### **1.2.5. Contaminación del suelo**

El suelo tiene la capacidad para desarrollar un sin número de funciones, pero esta se ve condicionada por la contaminación de este que afecta negativamente a su calidad y a sus propiedades. Un suelo está contaminado cuando tiene un componente químico significativamente acumulado y por lo tanto, tiene un efecto perjudicial que significa una carencia de la capacidad que debe poseer el suelo para cumplir con su aptitud de soportar el desarrollo normal de las plantas y que en casos extremos puede inutilizarse sin es que no se le otorga una medida de recuperación. Esta condición tiene una estrecha relación con el ingreso de contaminantes producidos por la actividad humana acumulados mediante de diversas fuentes de propagación (Bonilla, 2013).

La capacidad receptora del suelo se considera como primaria o secundaria, en función a participación en el sentido directo o indirecto. El tipo de suelo es un factor importante, debido a que la deposición de los contaminantes depende de ello, a la vez las funciones del suelo se ven interrumpidas, como lo es la transferencia de nutrientes del suelo a las plantas, ya que los distintos tipos de sustrato difieren en su vulnerabilidad a ser degradados (De la Peña, 2014). La contaminación del suelo se produce ante la presencia de algún agente externo al medio edáfico tanto físico, químico o biológico. La contaminación del suelo también se produce por fuentes generadoras como lo son los efluentes domiciliarios, los productos químicos y los relaves mineros que entran en contacto con el suelo (Neri, 2008; Arellano y Guzmán, 2011; Ibáñez *et al.*, 2013).

Los residuos provenientes de las fuentes industriales son una de las principales causas de la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas debido a la filtración provocada por los derrames de sustancias químicas. Del mismo modo, al no ser depositados en forma adecuada tanto los residuos domésticos como la basura y las aguas servidas, causan problemas de contaminación, al ocasionar la proliferación muchas plagas como ratas, moscas, cucarachas,

entre otros. Los biocidas que se utilizan para el control de plagas tanto de animales vertebrados como invertebrados, malezas y otros vectores de las enfermedades de las plantas, son otra fuente de contaminación. También la utilización de restos de residuos sólidos aplicados en los planes de fertilización en las tierras destinadas a la agrícola constituye una actividad contaminante que se manifiesta por el efecto de varios componentes de naturaleza química en forma de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , elementos traza, productos químicos de limpieza doméstica y otros que finalmente son esparcidos en el suelo. Por otro lado, la presencia en demasía de las sales en las fuentes de agua ( $\text{SO}_4(\text{Na})_2$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) al contactarse con suelo, producen salinización, dificultando la absorción del agua mediante las raíces de las plantas, afectando considerablemente los rendimientos de los cultivos, así como la degradación de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales (Arellano y Guzmán, 2011; Ibáñez *et al.*, 2013).

#### **1.2.6. Parámetros químicos del suelo**

##### **Conductividad eléctrica**

La presencia en el suelo de altas concentraciones de sales solubles es definida como salinidad. De acuerdo con sus propiedades estas sales pueden encontrarse indistintamente en las fases sólida y líquida de un suelo y por esta razón se considera que las sales pueden moverse extraordinariamente. La salinidad del suelo desde el punto de vista natural de origen natural constituye un proceso estrechamente relacionada a la aridez climática y a los componentes que tienen abundante contenido de materiales salinos que es característica de algunas rocas. Sin embargo, la salinidad también puede manifestarse como consecuencia del riego prolongado con aguas de elevado contenido de sales, así como también con el riego con agua de buena calidad, pero mal manejada, sobre todo en zonas de climas secos, semihúmedos o semisecos. La conductividad eléctrica (C.E.) mide la capacidad que tiene el suelo para conducir la corriente eléctrica debido a la capacidad que tienen las sales en la conducción de la corriente eléctrica. En consecuencia, la C.E. mide la concentración de sales solubles del suelo (Coeto, 2017).

La conductividad eléctrica de un determinado suelo está en relación proporcional a la cantidad de iones presentes y al grado de movilidad de éstos, lo cual permite estimar el contenido de sales. Los valores obtenidos de esta manera son solo orientativos y deben

complementarse con el nivel de salinidad y profundidad de la napa freática y con los sistemas de labranza desarrollados en sistema de producción, cuando se trata de un cultivo determinado. Se expresa en diecisiemens por metro ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) (Quiroga y Bono, 2012).

### **La reacción del suelo**

El potencial de hidrógeno (pH) es una de las propiedades químicas más importante que tiene el recurso suelo. Aunque es muy simple, puede no solo indicar la acidez, neutralidad o basicidad del suelo, también puede brindar pautas importantes relacionadas con el potencial que tiene un suelo desde el punto de vista agrícola, sobre los niveles de los elementos nutritivos que son esenciales para las plantas, así como los peligros de aquellos que son tóxicos. Además, ayudará a predecir la presencia de los elementos químicos que está adsorbidos por el coloide arcillo húmido y la relación con los procesos de acumulación de los pesticidas, que es un aspecto sumamente importante al momento de evaluar la contaminación del suelo y del agua (Quiroga y Bono, 2012). Plaster (2005) agrega que la reacción del suelo describe la acidez o alcalinidad de un suelo, los cuales tienen un efecto notorio en el crecimiento de las plantas. La reacción se mide con la ayuda de una escala de pH que oscila de 0 a 14 para las sustancias comunes y para el caso de los suelos esta escala tiene valores extremos que varían de 3,5 a 10,5. Normalmente, los suelos agrícolas están situados en valores de pH que varían de 5,0 a 8,0.

La reacción del suelo que se expresa en términos de pH es una característica principal dentro de las propiedades químicas. Una función importante del pH es regular la cantidad de elementos nutritivos disponibles y de manera indirecta influye sobre los factores biológicos en las plantas y regula las actividades de los microorganismos del suelo. La mayoría de los cultivos tienen un crecimiento normal cuando el pH del suelo está entre 5,0 a 7,5, porque dentro de ese rango la mayoría de los nutrientes esenciales para las plantas están disponibles para el crecimiento y desarrollo adquiriendo la condición de biodisponibles (Ministerio de Agricultura [MINAG], 2011). Según Porta *et al.* (2003) los valores de pH, puede variar la clasificación de los suelos. Aunque de manera general indica que habrá deficiencia de cationes básicos cuando el pH es  $<5$  será considerado como fuertemente ácido, el pH producirá una deficiencia moderada de nutrientes si está en un rango de 5 a 6 (moderadamente ácido); si el pH es  $<7$  pero  $>6,0$ ; es considerado como ligeramente ácido y si el pH adquiere u valor aproximado de 7 significa una alta disponibilidad de la mayoría de

elementos nutritivos (neutro), si el pH es  $>7$  significa que es ligeramente alcalino cuando el pH alcanza un valor  $>8,5$  indicará un alto porcentaje de sodio intercambiable (Porta *et al.*, 2003).

### **Materia orgánica**

La materia orgánica (M.O.) se refiere a la cantidad de restos orgánicos que se encuentran en proceso de descomposición, con capacidad de aumentar el contenido en nutrientes en el suelo, se expresa en porcentaje. La M.O. tiene una alta capacidad de intercambio de cationes, que consiste en una gran capacidad para retener cationes en el suelo; evitando así las pérdidas por lixiviación o lavaje. Además, favorece la microestructura del suelo que es una característica muy positiva para evitar o al atenuar la erosión al favorecer el desarrollo de los microorganismos en el suelo. Todos estos factores permiten conocer la gran utilidad que tiene la materia orgánica, permitiendo así, conocer indirectamente la fertilidad de un suelo determinado (Garrido, 1993).

Porta *et al.* (2003) explican que los suelos se originan partir de materiales parentales sin la presencia de la materia orgánica (M.O.). La biomasa muerta o necromasa procedente de plantas, animales y microorganismos y aquellos compuestos producto de la descomposición serán materiales que justifican la presencia componente orgánico en el suelo, cuyo contenido es mucho mayor en procesos iniciales del origen del suelo y en función a observaciones temporales en el tiempo de desarrollo del suelo, se puede asumir que puede alcanzar la constante dinámica o un estado estacional cuando las condiciones generales se mantienen, significando de esta manera que la cantidad de materia orgánica que entra a sistema suelo compensará las mermas que ocurren en periodos prolongados de 100 años en los suelos de arcillosos (textura fina) y de más de 1 500 años en suelos de arenosos (textura gruesa). Si la escala temporal es mucho más larga, resulta difícil que esto ocurra y no ocurrirán los niveles de equilibrio, sino se producirá un cambio lento y progresivo, como consecuencias de cambios a nivel mundial (Períodos de sequías alternados con periodos húmedos, calentamiento de la tierra, glaciaciones, etc.) (Sparks, 1998).

La materia orgánica aportada a la superficie del suelo (hojarasca, ramas, restos vegetales, deyecciones, etc.) forma el mantillo de la necromasa, cuya calidad y cantidad de sus

componentes determinan la el tiempo de descomposición ya que al sintetizarse más rápidamente la materia orgánica (lábil) que se incorpora a los suelos, contribuirá en un corto tiempo en convertirse en una fuente de energía que será aprovechada por los seres vivientes del suelo e influirá en la disponibilidad de los nutrientes para lograr una mayor productividad del sistema ecológico. Entre otros beneficios se manifiesta en el mejoramiento de la adsorción de los cationes con los elementos minerales, produciendo una mayor estabilidad de los agregados. Asimismo, la relación entre el contenido de carbono (C) y el de nitrógeno (N) del suelo (relación C/N), determinará la cantidad de la disponibilidad del para la nutrición de las plantas, Esta relación puede servir como un indicador cualitativo del material orgánico que está presente en un medio aerobio, relacionado con l velocidad de descomposición de la materia orgánica. La relación C/N será demasiado alta apara la materia orgánica reciente e irá disminuyendo a hasta que este material se convierta en humus (Porta *et al.*, 2003).

### **Fósforo**

El fósforo (P) como nutriente es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y se encuentra dentro de ellas formando la parte activa de todos los compuestos enzimáticos, los llamados ácidos nucleicos y las proteínas. Asimismo, tiene relación con las reacciones que se producen en el traslado de la energía. La cantidad de fósforo presente en el suelo está influenciada por el tipo de roca (material parental) y con una marcada influencia del clima, siendo las zonas más húmedas, las más deficientes en este nutriente (Quiroga y Bono, 2012). Teniendo en cuenta que el fósforo no es reciclado ni es rápidamente liberado por descomposición de materia orgánica, el P presente en forma disponible en el suelo es insuficiente para el desarrollo de las plantas, está deficiencia tiene que ser corregida con el uso de los fertilizantes fosforados. Niveles excesivos de P que se filtran en los ríos y océanos causan la eutrofización debido a un crecimiento excesivo de algas (Fernández, 2007).

Sanzano (2006) explica que las plantas absorben el fósforo existente en la solución del suelo que se encuentra formando los iones ortofosfato primario ( $\text{HPO}_4^{-2}$ ) y ortofosfato secundario ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ ). La absorción del P es afectada por el pH del suelo de la siguiente manera: Existe la predominancia de fosfatos cuando el pH es alto. Existe un movimiento demasiado escaso del fósforo a través del suelo. En consecuencia, la absorción del P por las raíces solo ocurre en las cercanías circundantes. Como consecuencia de que el contenido de fósforo en la fase

líquida (solución del suelo) es baja, la su absorción es activa, opuesto al gradiente del contenidos de P porque las raíces tienen mayor concentración de P que la solución del suelo. Entonces, una absorción activa significa un proceso que requiere energía, razones que disminuyen la capacidad acumuladora de las raíces, tal como sucede cuando la temperatura es baja, el agua está en un nivel excesivo, etc., factores que impiden la extracción del P.

### **Potasio**

El potasio (K) es otro de los elementos esenciales para el normal crecimiento y desarrollo de las plantas, tanto como en los animales. Las necesidades de las plantas por este elemento nutritivo lo ubican en el quinto lugar después del C, O, H y N (Borges *et al.*, 2005). El K está presente en el suelo en cuatro formas: Intercambiable como componente de la solución del suelo, en forma intercambiable, retenido en los complejos de intercambio y retenido formando parte de los minerales del suelo (Barber, 1995). Por lo tanto, las formas intercambiables y en solución están en formas disponibles para las plantas, las que, por lo general, son conocidas mediante la mayoría de los procedimientos de análisis de K disponible en el suelo.

Las formas disponibles son las más importantes para cultivos que crecen en suelos altamente meteorizados, los cuales tienen alto contenido de arcillas con muy limitadas cantidades de minerales primarios de K para la descomposición, sucediendo lo contrario en los suelos con bajo contenido de arcillas. Asimismo, la adsorción de K en las superficies de intercambio y su disponibilidad dependen de las características fisicoquímicas del suelo, muy especialmente del tipo de arcilla (International Plant Nutrition Institute [IPNI], 1991).

### **Carbonato de calcio**

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es la principal fuente de Ca de los suelos y se encuentra en cantidades muy variables, conformando guijarros y en algunos casos está presentes en forma de polvo muy fino. Cuando hay ausencia de  $\text{CaCO}_3$  los suelos son ácidos, aunque esta condición también puede darse en tierras básicas. En este último caso se tiene que aportar sulfato cálcico o yeso, para aumentar los niveles de Ca sin elevar ni disminuir el pH (Andrades y Martínez, 2014; Huamaní, 2018).

Los aniones  $\text{CO}_3^{2-}$  causan una acción positiva sobre la estructura del suelo y sobre la actividad de los microorganismos, pero cuando están en exceso producen efectos negativos en la nutrición de las plantas por producir un antagonismo con otros elementos. Los suelos ricos en  $\text{CO}_3^{2-}$  y con pH próximo a 8 suelen contener mucho  $\text{CaCO}_3$ , mientras que los suelos con altos contenidos en  $\text{CO}_3^{2-}$  y con pH superior a 8,5 suele predominar el carbonato sódico (Andrades y Martínez, 2014; Huamaní, 2018).

El  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{MgCO}_3$  se caracterizan por ser compuestos insolubles debido a que los cationes se asocian a las masas de agua que tienen un alto contenido de carbonatos, sean los de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , por tal motivo a medida que el suelo pierde humedad, se remueve el calcio y deja el sodio en su lugar, de la misma manera sucede con el bicarbonato y en consecuencia se forma un suelo alcalino, también conocido como suelo sódico (Palacios *et al.*, 2010). La presencia de carbonato o bicarbonato de sodio aumenta los riesgos de sodificación del suelo, cuyas reacciones producidas se muestran en la Figura 3.

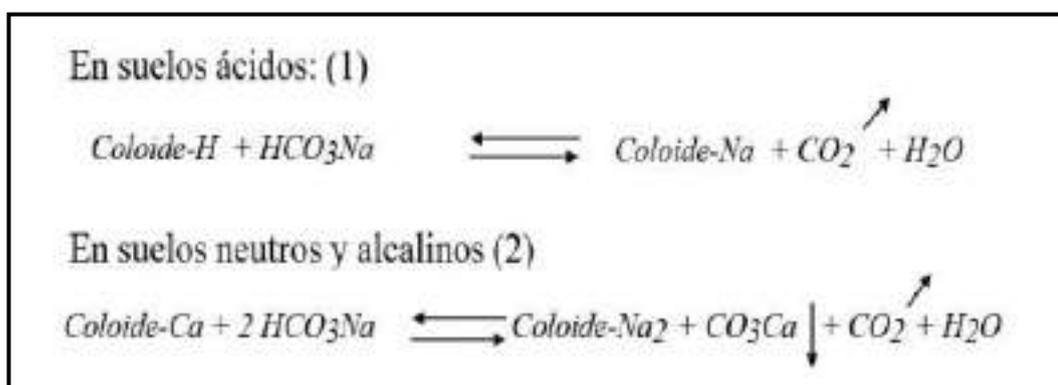


Figura 3. Reacciones de sodificación en suelos ácidos, neutros y alcalinos. Fuente: Jarsun (2008).

La reacción del suelo (pH) tiene un efecto significativo para que los elementos menores sean disponibles, de manera especial con respecto al Fe, Mn y Zn. En pH básico los elementos menores tienden a dar forma a compuestos químicos no solubles evitando de esta manera que los cultivos tengan una escasa disponibilidad de microelementos produciendo serias deficiencias. Asimismo, el uso de la fertilización dotados de Zn y Mn son ineficientes cuando los suelos tienen material cálcico en exceso, de tal forma que la adición de que fertilizantes

foliares no sean beneficiosas para cubrir las necesidades de las plantas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020).

### **1.2.7. Metales pesados**

Rodríguez *et al.* (2016) explican que los llamados “metales pesados” son minerales con pesos atómicos que varían de 63,5 a 200,6, con una densidad aparentes mayor a 4,0 g por cm<sup>3</sup>. Dentro de estos metales están el plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), zinc (Zn), cobre (Cu), plata (Ag) y arsénico (As); los que resultan ser tóxicos para todo tipo de seres vivos cuando se encuentran en niveles excesivos. Estos minerales considerados dentro del grupo de los elementos pesados fueron y son actualmente utilizados en una diversidad de actividades que se realizan en los sectores agrícolas, extracción minería, plantas metalúrgicas, galvanotecnia y en la purificación del oro. Los metales pesados son perseverantes, es decir, no son creados o degradados, ni mediante procesos biológicos ni antropogénicos. Reyes *et al.* (2016, p. 68) agregan lo siguiente:

La inhalación y la ingesta de alimentos son dos de las causas más sobresalientes de contaminación. Los efectos tóxicos dependen del tipo de metal, de la concentración y en algunos casos de la edad de la población expuesta. Algunos estudios que evalúan la contaminación de metales pesados en alimentos, carne y leche, han encontrado que el cadmio, el mercurio, el plomo y el arsénico, son cuatro de los elementos que por su impacto en la salud y concentración deben ser cuidadosamente evaluados y monitoreados con relación a la fuente de contaminación y su incorporación en la cadena alimenticia.

Los metales pesados son elementos tóxicos para la vida al encontrarse en altas concentraciones, pero a la vez son necesarios y son utilizados como micronutrientes para las personas, la flora y los microorganismos en general. Los metales al alcanzar los límites superiores son considerados contaminantes tóxicos, donde las fuentes de agua, suelo y aire que se contaminan se conviertan en sistemas peligrosos para toda forma de vida en el planeta y para los procesos ecológicos como es el caso del ciclo hidrológico, los ciclos de los nutrientes (biogeoquímicos), la liberación energética, el movimiento de las poblaciones, entre otros (Alguacil y Merino, 1998). De la Peña (2014) resalta que los metales pesados se encuentran de forma natural en el medio ambiente. Las actividades antropogénicas alteran la distribución de estos metales y así se convierten en contaminantes, este suceso ocurre

mayormente en el proceso extractivo y en la concentración de los recursos mineros o por expansión al medioambiente de los residuos de la actividad industrial y las emisiones del parque automotor.

### **1.2.8. Efecto de los metales pesados en el suelo**

El suelo al ser un mayor colector de los diversos desperdicios que son generados por los seres humanos, para dar origen a la contaminación que son transmitidos al acuífero o a los alimentos consumidos por el hombre y los animales, mediante la acumulación por los vegetales. Estos metales al alcanzar mayores proporciones que sobrepasan los límites tolerables afectan seriamente al desarrollo de los vegetales y produciendo alteraciones en la función de diversos componentes ambientales y con una clara merma de la población de microorganismos del suelo. Esta contaminación es conocido como “la polución de suelos” (Charles, 1997). Esta polución causada por elementos químicos tóxicos puede permanecer por un largo período de miles y millones de años, a pesar de que la contaminación haya sido detenida. Pero para algunos metales como el cadmio que tiene un intervalo de tiempo de vida de 15 a 1 100 años en el suelo y para el plomo es que es de 7 400 a 5 900 años cuyas concentraciones son influenciadas por las características fisicoquímicas y el tipo de suelo, el clima, el pH y el relieve del suelo (De la Peña, 2014).

Luego de una explotación minera en los suelos se encuentran remanentes de materiales residuales, escombros contaminados entre otros, causando severos problemas para el desarrollo de las especies vegetales y entre las características más visibles se observa una clase textural afectada con una estructura deteriorada, con propiedades químicas alteradas, con una escasa y desequilibrada presencia de nutrientes esenciales para la nutrición de las plantas producida por la ruptura de los ciclos biogeoquímicos, escasa profundidad efectiva que dificultad el normal desarrollo de las raíces, baja capacidad de cambio catiónico, escasa capacidad retentiva de agua y con la presencia de compuestos tóxicos (Puga *et al.*, 2006). Estas propiedades del suelo desempeñan un papel importante al reducir o incrementar el efecto tóxico de los metales sobre el suelo debido a que la distribución de los elementos pesados dentro los perfiles del suelo disponibilidad, está determinada por los parámetros dentro los cuales están las propiedades intrínsecas del metal y las características del suelo (Puga *et al.*, 2006).

El potencial hidrógeno o potencial de hidrogeniones de los suelos (pH) es un factor esencial para que la mayoría de los metales pesados se hagan más disponibles en medios ácidos con la excepción del arsénico (As), molibdeno (Mo), selenio (Se) y cromo (Cr), tienen una mayor disponibilidad en condiciones básicas. También, el proceso de adsorción de los minerales pesados es notoriamente influenciado por el pH. Las propiedades físicas del suelo favorecen el ingreso de los metales pesados mediante la infiltración, es así, que la arcilla tiene la capacidad de adsorber a los metales pesados reteniéndolos en sus posiciones de intercambio, contrariamente, en los suelos arenosos hay ausencia en la retención por lo que los elementos tóxicos pasan rápidamente a las capas profundas del suelo produciendo la contaminación de las aguas freáticas (Bonilla, 2013).

### **1.2.9. Movilización de los metales pesados en el suelo**

Los metales pesados que quedan retenidos en las partículas del suelo pueden también ser trasladados hacia el componente líquido (solución del suelo) por medio de diferentes procesos relacionados con la biología y la química. El movimiento relativo de los elementos pesados adquiere importancia con relación a la disponibilidad y posibilidad del lavado de estos metales desde los perfiles del suelo hacia las aguas freáticas con diferencias en relación a su origen natural o antropogénico. Los factores que influyen en la movilización de los elementos químicos pesados tal como señala Solano (2005) son los siguientes: (a). Propiedades del suelo: Reacción, potencial de óxido reducción, constituyentes iónicos de la fase líquida del suelo, capacidad de intercambio catiónico, niveles de  $\text{CO}_3^{+2}$ , carbono orgánico, clase textural, entre otras), (b) Clase de contaminantes (procedencia y forma de deposición del elemento pesado), y (c) Condiciones climatológicas (lluvias (acidificación), cambios en las condiciones redox, variaciones de la temperatura y la humedad).

De la Peña (2014) agrega que los procesos de movilidad, transporte y distribución de los metales pesados están muy estrechamente relacionados con la forma química y con las reacciones fisicoquímicas que los metales pesados mantengan una correlación con las demás especies de la corteza terrestre. Estos mecanismos básicamente están relacionados con los procesos de dilución, adsorción, precipitación, oclusión, migración, acomplejamiento, difusión, unión con los componentes orgánicos, absorción por la microbiota y volatilización,

pero no se debe dejar de lado a los factores que tiene influencia significativa como es el caso pH del suelo, principalmente, y del contenido de materia orgánica en menor intensidad. En consecuencia, los elementos químicos pesados son liberados de la fracción líquida para luego ser retenidos en los coloides del suelo cuando el pH aumenta, mostrando una baja disponibilidad para las plantas. El incremento del pH produce un aumento en la adsorción de los elementos metálicos, pero con diferencias que dependen de los tipos de minerales, en este caso es mayor para el plomo y menor para el cadmio. Los valores del pH se mantienen altos debido a la presencia de carbonatos.

#### **1.2.10. Acumulación de metales pesados en las plantas**

Baker *et al.* (2000) explican que hay varias plantas que pueden resistir la presencia de altas concentraciones de los elementos químicos en el medio edáfico debido a que tiene la capacidad de restringir la absorción y/o translocación con dirección a la zona foliar, proceso que es denominado estrategia de exclusión. Asimismo, otro grupo de vegetales pueden absorber y acumular a los metales pesados de manera activa en la zona aérea, proceso que es conocido como estrategia acumuladora, pero requieren de una especialización fisiológica elevada. Existe una diferenciación en los tipos de almacenamiento de los metales, desde mínimos incrementos hasta respuestas extremas donde el metal puede superar la unidad porcentual de peso seco del vegetal. En consecuencia, la condición extractora de las plantas es función de capacidad que tienen en la absorción, translocación y secuestro del elemento químico acumulado en porción aprovechable en relación con el rendimiento total obtenido.

Aunque las especies vegetales que pueden acumular cantidades mayores de metales pesados son muy pocas (hiperacumuladoras) tienen la capacidad de producir bajas cantidades de masa vegetal, tienen un crecimiento menor por lo que tienen limitaciones para ser utilizadas en las actividades de fitorremediación. Sin embargo de manera adicional, poder ser utilizadas plantas tolerantes pero no hiperacumuladoras combinadas con el mejoramiento del suelo para disminuir la disponibilidad y exposición de los metales (fitoestabilización). Aunque recientemente se ha estudiado bastante esta problemática pero son escasas las plantas que han sido estudiadas como fitocorrectoras por lo que aún se requiere ampliar los conocimientos botánicos de muchas especies para encontrar plantas potencialmente útiles en los procesos de la fitocorremediación (Baker *et al.*, 2000).

### **1.2.11. Tolerancia de las plantas a metales pesados**

La capacidad que tienen las plantas con relación a la presencia de los metales pesados está expresada por la habilidad que tienen los vegetales de poder sobrevivir en un medio que es tóxico para otras especies. Esta capacidad se hace notoria como una función entre el genotipo y el medio ambiente que lo rodea, determinándose así el nivel de sobrevivencia. La tolerancia de las plantas con respecto a los metales pesados es mayormente interna, ya que los metales son absorbidos por plantas que crecen en un sustrato que está compuesto por muchos metales, donde la planta debe poseer una serie de adaptaciones fisiológicas y bioquímicas adquiridas para desarrollarse en la presencia de diferentes metales y en un complejo de especies y poblaciones. En consecuencia, un sistema eficiente de fitorremediación se basa en las especies de plantas satisfagan dos condiciones: a) tolerancia a con respecto a los metales y b) Deben tener capacidad de acumulación relacionadas con la absorción, detoxificación y secuestro. Así, una planta ideal debe tener la habilidad para sobrevivir ante la presencia de más de un metal en el medio donde está en crecimiento (Medina y Montano, 2014).

El repoblamiento vegetal de las áreas con especies tolerantes y con capacidad de acumulación de los metales pesados, ayuda en la estabilización del suelo y en la recuperación de los ciclos en el horizonte superficial del suelo, constituyendo así el primer paso en la descontaminación o la fitocorrección. La identificación de especies que se caracterizan por un rápido crecimiento con capacidad de crecer en suelos empobrecidos y contaminados, remanentes de la acumulación de la actividad minera; son de gran importancia y en el estudio del comportamiento de los metales continúa y son la base para el desarrollo de la fitocorrección (Álvarez *et al.*, 2003).

### **1.2.12. Plomo**

El plomo (Pb) es un elemento químico con número atómico 82, un peso atómico de 207,19 y con 2 y 4 valencias químicas. Es un metal pesado de color azulado y puede oscurecerse adquiriendo un color gris mate. Además, es flexible, inelástico y se funde fácilmente y no le afecta el ataque con los ácidos sulfúrico y clorhídrico, aunque es disuelto lentamente con el

ácido nítrico. El plomo forma sales de plomo con los ácidos, así como sales metálicas como el ácido plúmbico, además forma óxidos y compuestos organometálicos, por lo que está considerado dentro del grupo de los anfóteros (Bonilla, 2013). El plomo (Pb) se encuentra en el suelo en la forma de  $Pb^{+2}$ , principalmente, aunque también es conocido en un estado de oxidación como  $Pb^{+4}$ . El Pb no desempeña un papel esencial en las plantas y su absorción, de producirse, es de tendencia pasiva con una tasa de absorción que se reduce al aumentar el pH especialmente con temperaturas bajas. La industria automotriz, los lodos residuales, la combustión del carbón, la incineración de residuos, entre otros, son las fuentes más frecuentes en la contaminación producida por el Pb (Sierra, 2005).

Últimamente el plomo con origen antropogénico en los suelos ha merecido más atención debido a que este metal es un peligro tanto para el hombre, así como para los animales por las siguientes razones: a) Su inclusión en la cadena alimenticia y b) por la inhalación del polvo del suelo contaminado con Pb. Aunque el Pb es un metal ligeramente fitodisponible y, por lo tanto, difícil de fitoextraer, hay varias plantas (por ejemplo, *Thlaspi* sp., “maíz” *Zea mays* L. y “girasol” *Helianthus annuus* L. que acumulan cantidades mayores de Pb, especialmente en las raíces. La acumulación de Pb en suelos superficiales es de gran importancia ecológica ya que afecta la actividad biológica de los suelos. La absorción de Pb por las raíces es pasiva y el porcentaje de captación puede ser disminuida mediante la aplicación de enmiendas calcáreas (encalado) y disminuyendo temperatura. El plomo que es difícilmente soluble cuando está en el suelo, será absorbido por las raíces absorbentes (pelos absorbentes) y se almacenarán en las paredes de las celulares, también es absorbido fácilmente por las plantas a través del follaje (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Huamaní, 2018).

### **1.2.13. Efecto del plomo sobre el ambiente**

A pesar de que en el medioambiente existen pequeñas cantidades de plomo las mayores cantidades que se acumulan en el planeta es generado por la actividad humana al combustionar el petróleo, actividades de la industria y la quema de la basura (residuos sólidos). Estos acontecimientos producen la generación de pequeñas fracciones de Pb que luego se depositarán en los suelos y los mantos de agua para luego moverse mediante el aire para permanecer especialmente en la estratósfera. Los efectos negativos causados por el

plomo afectan al nivel de fertilidad de los suelos, limita la acción clorofílica produciendo un efecto negativo en el fitoplancton que viven en el agua, pero algunos vegetales tienen la capacidad de absorción alta que puede llegar hasta  $500 \text{ mg.kg}^{-1}$  de plomo sin ningún perjuicio (Palacios, 2016).

Las partículas de suelo retienen cerca del 90 % de la contaminación ambiental producida y los sedimentos acuáticos interceptan cerca del 9 % de la contaminación restante. En la actualidad la contaminación del suelo con Pb es preocupante, porque su permanencia en los suelos es por mucho tiempo, produciéndose un equilibrio dinámico, que incluye al ser humano (Huang, 1999, citado por Bonilla, 2013). Por lo general, el metal tóxico plomo se sedimenta a profundidades de 2 a 5 cm de la corteza terrestre (USEPA, 1986, citado por De la Peña, 2014). Aunque ese metal sedimentado podría haberse originado de fuentes fijas que se encuentran a kilómetros de distancia, como por ejemplo de un relave minero que es producido por escurrimiento e infiltración del metal, produciendo y contribuyendo a la contaminación de cualquier otro medio cercano.

#### **1.2.14. Efecto fisiológico del plomo en las plantas**

La parte radicular de las plantas tiene la capacidad de absorber los metales pesados que se encuentran accesibles en el suelo, sobre todo cuando estos tienen la tendencia a acumularse. El cultivo de las plantas en suelos contaminados absorbe mayormente más oligoelementos y la concentración de éstos en los tejidos, está frecuentemente relacionado con la abundancia en los suelos, muy especialmente en la fase líquida (solución del suelo). Las altas concentraciones de los contaminantes tóxicos pueden alterar el nivel cualitativo de los productos alimenticios, afectar a los sistemas productivos de los cultivos y alterar la calidad del medio ambiente, debido a que el elemento contaminante se traslada mediante la cadena alimenticia, al ser consumidos los vegetales por la fauna doméstica para luego ser consumidos por la población humana (Puga *et al.*, 2006).

Según García (2006) la fitotoxicidad que es producida por la presencia del plomo en las funciones fisiológicas de las plantas y puede producir una eventual muerte de las células cuando se encuentra en altas concentraciones. Los procesos fisiológicos que son afectados

en forma notoria son las siguientes: las actividades enzimáticas, la nutrición vegetal, el recurso hídrico, el estado de las hormonas, la formación de la membrana y el movimiento de electrones de los elementos nutritivos. Los síntomas causados por la condición tóxica del plomo son agrupados de los diversos síntomas que pueden ser específicos y no específicos. El síntoma visual es considerado no específico y puede causar una disminución clara en el desarrollo de las raíces, reduciendo paralelamente la superficie de las hojas, originando clorosis manifestada por coloraciones marrón-rojizas tanto en los tallos, pecíolos y hojas, produciendo finalmente una necrosis foliar. Asimismo, otro efecto de la toxicidad por plomo es la inhibición de la capacidad de germinación de las semillas, retardando el crecimiento y desarrollo de las plantas. García (2006) agrega que los síntomas más claros producen la merma en el porcentaje e índice de germinación, afecta a la relación raíz/parte foliar de la planta, reducción de la tolerancia al Pb y al Hg con una notoria disminución del peso en seco del sistema radícula y de la parte foliar de la planta.

#### **1.2.15. Efecto del plomo en la salud**

El acceso del plomo al organismo humano puede darse a través de la ingesta, la respiración o por el contacto con la piel. La exposición y los niveles de plomo producen un desarrollo activo en el cual el metal (Pb) se localiza en la sangre, como resultado de exposición recientes, la evacuación y el equilibrio en relación con otros tejidos. La carencia de Fe, proteínas, Ca y/o Zn en el cuerpo humano, facilita la entrada del plomo al organismo, ocasionando la presencia de enfermedades (De la Peña, 2014). Los mecanismos de toxicidad del plomo han sido estudiados en diferentes procesos bioquímicos, donde la perturbación enzimática en procesos celulares es la más importante. La frecuencia y severidad de los síntomas médicos producidas por la toxicidad del plomo aumentan con la mayor cantidad de plomo en la sangre y los síntomas más fáciles de observar a causa del envenenamiento, son la pérdida del apetito, náuseas, vómitos, calambres estomacales, estreñimiento, falta de sueño, cansancio, cambio de carácter, dolores de cabeza, y articulares o musculares, deficiencia de Fe y merma en la actividad sexual. Después de muchos años cuando la deficiencia se vuelve crónica, los daños se manifiestan afectando a los sistemas nervioso, hematopoyético, renal y reproductor. Estos daños con los efectos adversos sobre la salud es consecuencia debido a que el plomo no tiene ninguna función biológica en los organismos vivos (Rodríguez *et al.*, 2016).

La Organización Mundial de la Salud [OMS] (2018) considera que el plomo es uno de los diez productos químicos que causan graves problemas en la salud pública, señalando que es sumamente urgente la intervención de los Estados Miembros para proteger la salud de la humanidad, especialmente de los trabajadores, los niños y las mujeres en edad fecunda. Las razones se basan en que los niños de corta edad son muy vulnerables a las fuentes de contaminación, llegando a absorber cantidades de plomo que varían entre 4 a 5 veces más que los adultos. El plomo al ser incorporado al organismo humano es trasladado hacia diversos órganos, depositándose en el cerebro, hígado, riñones, huesos y dientes, acumulándose con el transcurso de los años. En la Figura 4 se observan los diferentes medios como el plomo que se encuentra en el ambiente puede llegar al organismo del ser humano:

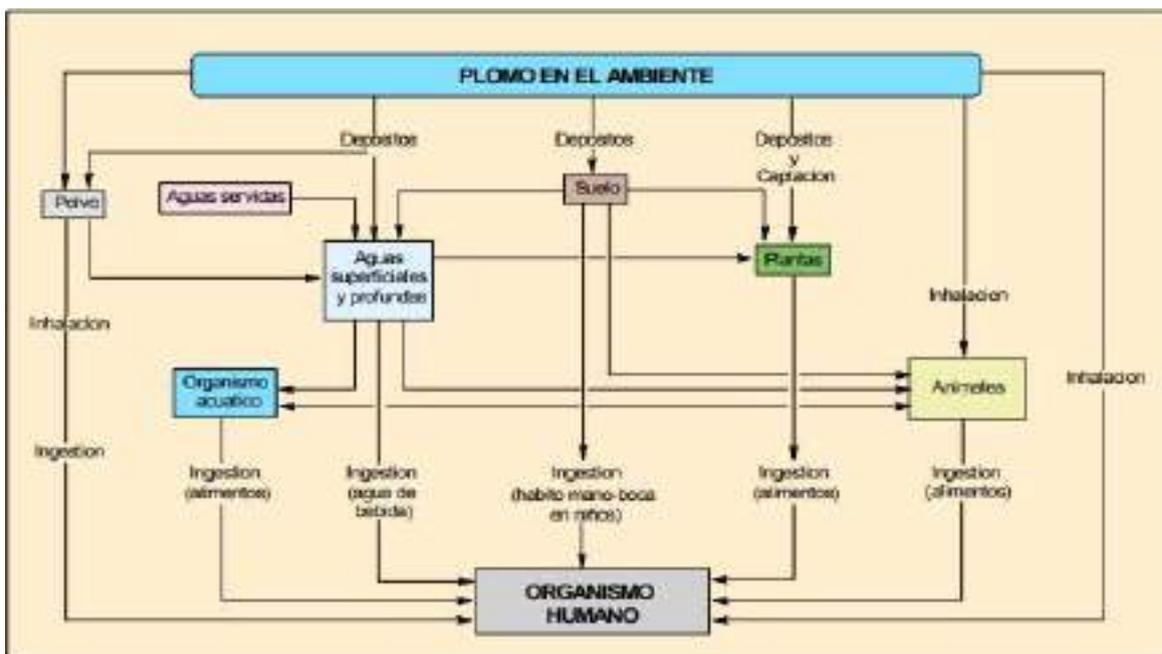


Figura 4. Vías de ingreso del plomo al organismo humano. Fuente: Oriundo y Robles (2009).

El plomo también se almacena en el sistema óseo y circula en el torrente sanguíneo en el embarazo, causando un serio peligro para el feto. Además, los menores desnutridos son sumamente susceptibles a la presencia del Pb debido a que sus órganos pueden retener cantidades significativas de este elemento pesado ante la ausencia carencial de otros minerales nutritivos que son esenciales, tal es el caso de la carencia del Ca. La población más expuesta a los mayores riesgos del exceso de plomo son los infantes de corta edad, incluyéndose a los fetos en proceso de desarrollo en el vientre materno (OMS, 2018).

### 1.2.16. Fitorremediación

El conjunto de técnicas que disminuye tanto *in situ* como *ex situ* la concentración de diversos compuestos químicos contaminantes mediante actividad bioquímica de las plantas asociadas con los organismos que viven en el suelo, es denominado fitorremediación. En tal sentido la fitorremediación se vale de los vegetales para hacer la remoción, reducción, transformación, mineralización, degradación, volatilización o estabilización de los agentes que causan contaminación (Cho *et al.*, 2008). Consiste en una técnica alternativa y sustentable mediante la utilización de diversas plantas para la recuperación directa de los suelos que están contaminados. Esta tecnología es potencialmente apta para limpiar eficazmente con costo muy bajo de los agentes de contaminación. Tanto las plantas cultivadas y nativas que son utilizadas en la fitorremediación de áreas contaminadas, pero la absorción de los contaminantes por la planta es variable de acuerdo con la clase de la sustancia contaminadora y la clase de suelo, surgiendo la posibilidad de elegir el cultivo de acuerdo con el nivel y tipo del contaminante existente. Así, se han encontrado especies con la hipercapacidad de acumular diferentes contaminantes (Agudelo *et al.*, 2005). Los procesos que comprenden las diferentes técnicas de la fitorremediación son:

#### Fitoextracción

Es un proceso se basa en la utilización de plantas que absorben y acumulan los contaminantes en sus estructuras radicales, tallos o follajes, tal con se señala en la Figura 5.

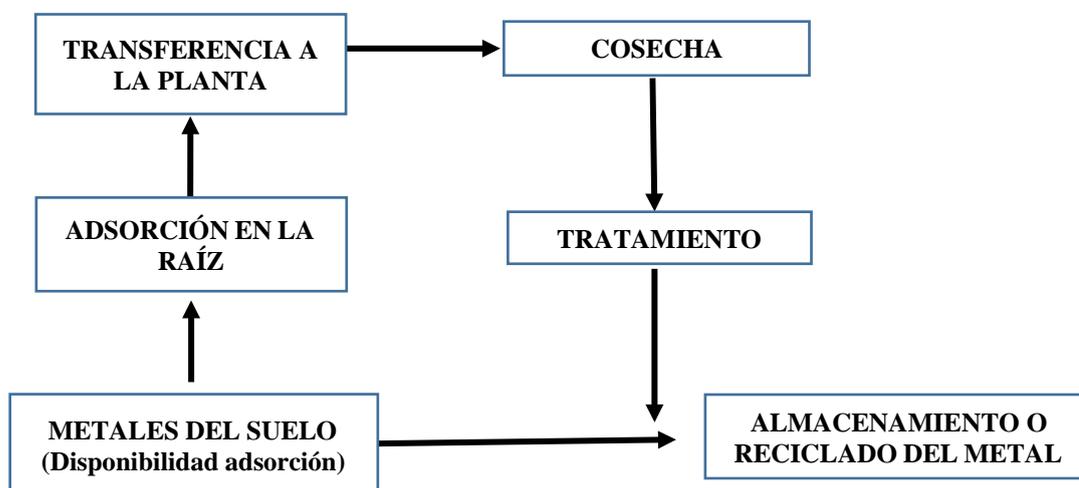


Figura 5. Esquema del proceso de fitoextracción. Fuente: Alguacil y Merino (1998).

Esta tecnología es considerada viable ya que las plantas de biomasa elevada tienen la capacidad de almacenar más del 1 % del contaminante tóxico en sus tejidos, considerándolo

así económicamente rentable. En este proceso se puede destacar a plantas de la familia *Brassicaceae*, como la *Brassica juncea* L. Czern., la cual almacena plomo en sus tallos, y a la familia *Fabaceae*, como el *Medicago sativa*, por acumular plomo en sus raíces (Ramos, 2019).

### **Rizofiltración**

Este proceso está basado en la utilización de plantas acuáticas, las mismas que emplean el área de la zona radicular para bio-absorber los metales pesados (Ramos, 2019). A inicio de los años 90, se abrieron nuevas expectativas en el uso de plantas terrestres que habían crecido en labranza hidropónica y que conseguía unos sistemas radiculares más prolongados para absorber a los contaminantes tóxicos (Medina y Montano, 2014).

### **Fitoestabilización**

Este proceso consiste en la inmovilización y reducción de la biodisponibilidad de los metales pesados, mediante la utilización de un sistema denso de raíces de plantas tolerantes desarrolladas en zonas contaminadas (Diez, 2008). La planta *Vetiveria zizanioides* (planta perenne de la familia de las gramíneas) tiene la capacidad de fitoestabilizar el metal plomo (Ramos, 2019).

### **Fitovolatilización o Fitovolatilización**

Consta del traspaso de los contaminantes desde el agua o suelo hacia la atmósfera, donde las plantas cumplen la función de intermediarias. Este proceso es utilizado mayormente para contaminantes orgánicos, pero también existen trabajos donde demuestran que las plantas pueden volatilizar y eliminar metaloides tales como el mercurio y el arsénico (Diez, 2008).

### **Fitodegradación**

En este proceso la vegetación convierte a los agentes contaminantes en materiales inertes a través de la metabolización. Ramos (2019) sostiene que el EPA en el año 2000 demostró que plantas como “papagayo” *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc., “sauce” *Salix nigra* Marshall, “álamo” *Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall y “álamo amarillo” *Liriodendron tulipifera* L., tienen una alta capacidad para remediar zonas que han sido contaminadas con disolventes clorados, tricloroetileno, herbicidas, insecticidas y fenoles.

### **1.2.17. Fases de la fitorremediación**

#### **Absorción**

La absorción es un proceso que se produce en la rizodermis de las raíces jóvenes, las mismas que tienen la capacidad de absorber las sustancias producidas por la actividad osmótica que influenciado por factores de origen externo como las variaciones de la temperatura y del pH. También existen otros elementos de importancia que facilitan la absorción del contaminante: están el peso molecular y la hidrofobicidad, los mismos que permiten a las moléculas atravesar la membrana celular de los vegetales. Luego de atravesar la membrana celular, los elementos contaminantes se esparcen por todos los órganos del organismo vegetal (Harvey *et al.*, 2002). Los compuestos que son absorbidos por las raíces ocurren mediante dos procesos: el proceso activo y el proceso pasivo. El proceso activo necesita de un gasto de energía para el ingreso de iones contra un gradiente químico. El proceso pasivo a diferencia no requiere de un gasto de energía para que los iones ingresen a la raíz de la planta hasta llegar a la endodermis, desde la solución externa a través de un gradiente de concentración. Los metales tóxicos para que puedan ser absorbidos depende de la demanda del contaminante y de la aportación en concentración de la solución suelo, siendo este un limitante muy frecuente para las plantas (Yarasca, 2015).

#### **Excreción**

Muchos de los contaminantes que son absorbidos por las raíces, se eliminan por medio de las hojas (fitovolatilización). Cuando existen altas concentraciones de contaminantes, solo pequeñas fracciones y en muchos casos sólo el 5 % son excretados sin causar cambios en la estructura química (López *et al.*, 2005).

#### **Desintoxicación**

López *et al.* (2005 p. 12) señala que “la desintoxicación de contaminantes por fitorremediación se realiza empleando al menos uno de los siguientes mecanismos: fitoextracción, rizofiltración, fitoestimulación, fitoestabilización, fitovolatilización y Fitodegradación”, procesos que se llevan a cabo mediante la mineralización hasta formarse el dióxido de carbono.

### **1.2.18. Ventajas y limitaciones de la fitorremediación**

Según Diez (2008) y Ramos (2019) las ventajas y las limitaciones que consideran de la fitorremediación son las siguientes:

#### **Ventajas**

- Aplicable para la remediación de una gran variedad de contaminantes: orgánicos e inorgánicos.
- Ayuda a la reducción de grandes cantidades de residuos que llegan a los vertederos.
- No requiere un equipamiento caro o altamente especializado.
- La aplicación de este método puede ser también de manera “*in situ*”.
- Disminuye la alteración del suelo y la dispersión de agentes contaminantes.
- Los resultados de su aplicación indican que el método de la fitorremediación es más económico que los demás métodos convencionales.
- Algunas especies de plantas tienen la capacidad de tolerar elevadas concentraciones de contaminantes orgánicos que la mayoría de los microorganismos.

#### **Limitaciones**

- La limitación principal está determinada por la profundidad que alcance las raíces y la disposición de los contaminantes en el suelo.
- El crecimiento de las especies vegetales puede encontrarse condicionado por las elevadas concentraciones de los contaminantes.
- Dependiente de las condiciones climatológicas, se requiere de condiciones apropiadas para el desarrollo de los cultivos a utilizar.
- La efectividad de la capacidad de la vegetación puede estar condicionado por los daños ocasionado por algunas enfermedades.
- La utilización de especies vegetales inapropiadas o no nativas del lugar podrían ocasionar en la biodiversidad una alteración.

### **1.2.19. Plantas utilizadas en la fitorremediación**

Actualmente se cuenta con una diversidad de especies vegetales utilizadas en la fitorremediación que han sido probadas tanto a nivel de campo como de laboratorio, para la fitorremediación, teniéndose identificadas plantas que taxonómicamente son de 45 familias,

las mismas que han mostrado tolerancia a los metales y con capacidad de desarrollarse en altas niveles de metales pesados. Dentro del grupo taxonómico de las angiospermas están seleccionadas algo de 400 plantas hipereacumuladoras y las familias que predominan son: Asteraceas, Brassicaceas, Caryophyllaceas, Cyperaceas, Cunoniaceas, Fabaceas, Flacourtiaceas, Lamiaceas, Poaceas, Violaceas y Europhobiaceas, las misma que tiene posibilidades en la hiperacumulación de metales (Nabulo *et al.*, 2011).

### **1.2.20. Técnicas de cuantificación de metales pesados**

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica que se basa en una fuente de átomos elementales o iones que están electrónicamente activados por la luz monocromática, permitiendo la absorción y la medición del elemento químico por el instrumento. La primera etapa de esta técnica consiste en la formación de un aerosol de microgotas por medio del nebulizado, donde una bomba peristáltica suministra continua la solución del analito de un chorro de aire comprimido para producir una fina niebla de gotas muy pequeñas, que se dirigen hacia una delgada llama de aire/acetileno produciéndose la atomización del analito. Los gases de combustión se mezclan antes de la combustión, donde el acetileno se quema produciendo una temperatura de 2 000 a 2 200 °C. Si es necesario temperaturas más altas, las mezclas de gases acetileno/óxido nitroso pueden utilizarse. El acetileno y el aire de la espectroscopia atómica son mezclados para luego ser pasados por el flujo de gas donde se enciende, colocándose una campana de extracción de los gases ubicada en la parte superior de la chimenea de salida del espectrofotómetro (Skoog, *et al.*, 2001).

### **1.2.21. Factores de concentración**

Medina y Montano (2014) reportan la existencia de algunos parámetros que indican la posibilidad que tienen las plantas en la absorción y traslocación de los elementos químicos del suelos hacia la hojas, tallos, frutos y semillas (parte aérea). Estos factores son los siguientes:

#### **a. Factor de bioconcentración**

Al factor de bioconcentración (BF) también en inglés se le conoce como bioconcentration index (BI), biological absorption coefficient (BAC), transfer coefficient (TC), concentration

factor (Cf) or bioaccumulation coefficient (BAC). Este factor sirve mide la cantidad de un metal captado tanto por la raíz así como por la parte aérea de una planta en función a la concentración del metal en el suelo. En otras palabras, el BCF se utiliza en las plantas como una medida de la eficiencia en la acumulación de metales en biomasa radicular y aérea, donde los valores menores de uno (<1) indican que las especies son hipereacumuladoras, mientras que las que poseen un BCF mayores de uno (>1) son consideradas como exclusoras. En consecuencia, cuanto el BCF sea menor, mayor será la capacidad de exclusión (Medina y Montano, 2014).

### **Factor de bioconcentración en la raíz de la planta**

Lokeshwari y Chandrappa (2006) explican la existencia de algunos parámetros para saber si la planta tiene la capacidad para la absorción y translocación de elementos químicos que están concentrados en el suelo y movilizarlos hacia la zona aérea. Al factor de concentración de la raíz de la planta también se le conoce como factor de concentración biológica (BCF) o Root accumulation factor (RAF). El BCF determinado mediante la comparación de la cantidad de metales presentes en la zona radicular con relación al contenido del elemento metálico presente en el suelo.

### **Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta**

Lokeshwari y Chandrappa (2006) explican que este factor que indica la concentración de un metal en la parte aérea de la planta también es conocido como bioaccumulation factor (BAF), biological accumulation coefficient (BAC), remediation factor (RF) o shoot accumulation factor (SAF). Este factor es tomado en cuenta para conocer la cantidad del metal que está acumulado en la zona aérea del vegetal en relación con el elemento contenido en el suelo.

Ambos factores de bioconcentración son calculados mediante las siguientes relaciones:

$$BCF_{Raíz} = \frac{[metal]_{raíz}}{[metal]_{suelo}}$$

$$BCF_{Aérea} = \frac{[metal]_{aérea}}{[metal]_{suelo}}$$

Donde:

$BCF_{Raíz}$  = Factor de bioconcentración en la raíz de la planta.

$BCF_{Aérea}$  = Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta.

$[metal]_{raíz}$  = Concentración del metal solo en la raíz de la planta en  $mg.kg^{-1}$ .

$[metal]_{aérea}$  = Concentración del metal solo en la parte aérea de la planta en  $mg.kg^{-1}$ .

$[metal]_{suelo}$  = Concentración del metal en el suelo en  $mg.kg^{-1}$ .

## **b. Factor de translocación**

El factor de translocación (TF) es el cociente entre la concentración del metal en los órganos aéreos y la concentración del metal en la raíz. Si el factor de translocación es mayor de uno ( $>1$ ) indica una gran capacidad para transportar metales desde las raíces a los órganos aéreos de la planta, demostrando un eficiente sistema de transporte de metales pesados, probablemente debido al secuestro del metal por las vacuolas de las hojas y en el apoplasto. Este proceso es característica de las plantas hipereacumuladoras para comparar si el contenido del metal de la parte aérea sobre el contenido en la zona radicular es  $>1$ . Al contrario, los vegetales no acumuladores tendrán mayor contenido de un metal en la zona radicular y menor en la parte aérea (Lokeshwari y Chandrappa, 2006). Cuando el factor de translocación es  $>1$  indicará el eficiente traslado del metal hacia la parte aérea, indicando que la planta es fitoextractora, pero si el resultado obtenido es  $<1$ , indica que una baja translocación del metal porque fue acumulado en mayor proporción en la zona radicular de la planta, en consecuencia, puede ser utilizada como planta fitoestabilizadora.

$$TF = \frac{[metal]_{aérea}}{[metal]_{raíz}}$$

Donde:

TF = Factor de traslocación

$[metal]_{raíz}$  = Concentración del metal solo en la raíz de la planta en  $mg.kg^{-1}$ .

$[metal]_{aérea}$  = Concentración del metal solo en la parte aérea de la planta en  $mg.kg^{-1}$ .

### **1.2.22. Estándares de calidad ambiental**

Los estándares de calidad ambiental (ECAs) son medidas que establecen la proporción de la concentración o en otras palabras del grado de los minerales, las sustancias o características físicas, químicas y biológicas que están ubicados en el aire, el agua o el suelo, que actúan como receptores, no representando ningún riesgo importante para la población ni para el

medioambiente. De acuerdo a la característica que está tratando, la acumulación o nivel será considerada en las categorías de rangos o niveles máximos o mínimos (Ley General del Ambiente, 2005).

### Estándares de calidad ambiental para suelos

Mediante el Decreto Supremo N° 011-2017 (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017) los estándares de calidad ambiental para los suelos de acuerdo con el tipo de uso son los siguiente (Tabla 1).

Tabla 1

*Estándares de calidad ambiental para suelos*

| Parámetros en<br>mg.kg <sup>-1</sup> PS | Uso de suelo |                         |                                     | Métodos<br>de ensayo                           |
|---|--------------|-------------------------|-------------------------------------|--|
|   | Agrícola     | Residencial/<br>Parques | Comercial/<br>Industrial/Extractivo |  |
| <b>INORGÁNICOS</b>                      |              |                         |                                     |  |
| Arsénico                                | 50           | 50                      | 140                                 | EPA 3050<br>EPA 3051                           |
| Bario total                             | 750          | 500                     | 2 000                               | EPA 3050<br>EPA 3051                           |
| Cadmio                                  | 1,4          | 10                      | 22                                  | EPA 3050<br>EPA 3051                           |
| Cromo total                             | **           | 400                     | 1 000                               | EPA 3050<br>EPA 3051                           |
| Cromo VI                                | 0,4          | 0,4                     | 1,4                                 | EPA 3060/<br>EPA 7199 o<br>DIN EN 15192        |
| Mercurio                                | 6,6          | 6,6                     | 24                                  | EPA 7471 EPA<br>6020 o 200.8                   |
| Plomo                                   | 70           | 140                     | 800                                 | EPA 3050<br>EPA 3051                           |
| Cianuro Libre                           | 0,9          | 0,9                     | 8                                   | EPA 9013 o<br>ASTM D7237 y/o<br>ISO 17690:2015 |

*Fuente:* MINAN (2017).

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño de la investigación**

La investigación desarrollada fue de tipo experimental con un enfoque descriptivo y correlacional, donde se observaron los cambios producidos en la “alfalfa” cultivada en macetas debido a la aplicación de tres niveles de plomo (70, 140 y 210 mg.kg<sup>-1</sup>) más un testigo (0 mg.kg<sup>-1</sup>). Este tipo de investigación establece relación causa-efecto, específicamente cuando se estudia como variable independiente (causa) modifica una variable dependiente (efecto) (Little y Hills, 2002). Se consideró los niveles de plomo que fueron absorbidos por la “alfalfa” tanto por las raíces, así como por la parte aérea (follaje) y el remanente que quedó en el suelo.

#### **2.1.1. Lugar y fecha**

La investigación se llevó a cabo en un tinglado especialmente preparado para la ejecución del proyecto, ubicado dentro del campus de la Facultad de Ingeniería Agraria en la Filial Huaura: Végueta de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (ver Apéndice 8). La Facultad está ubicada en el km 159 de la antigua carretera Panamericana Norte en el centro poblado de Mazo, pasando el desvío para el ingreso a Végueta. Geográficamente se encuentra en las coordenadas UTM WGS84 zona 18 sur 215 257,68 m e 8 780 216,52 s a una altitud de 68 m.s.n.m. (ver Apéndice 1). La ejecución de la investigación tuvo una duración de 9 meses, iniciándose en enero y culminando en el mes de setiembre de 2019.

#### **2.1.2. Técnicas instrumentales**

Para la evaluación de los contenidos de plomo tanto en el sustrato utilizado en el experimento, así como el plomo extraído por la planta de “alfalfa” (raíces y parte aérea) y el remanente de plomo en el suelo, fueron interpretados de acuerdo con los límites máximos

permisibles señalados por el MINAN (2017) y para la interpretación de las propiedades de los suelos se tomó en cuenta las tablas de valores críticos propuesto por Schoeneberger *et al.* (1998). El análisis estadístico fue realizado teniéndose en cuenta el diseño completamente al azar de acuerdo con Little y Hills (2002).

### **2.1.3. Descripción del experimento**

El trabajo de investigación fue desarrollado considerando las siguientes fases:

#### **Fase preliminar**

Esta primera fase comprendió las siguientes actividades:

- a. Gestión para la obtención del permiso para el uso del laboratorio y el tinglado de la Universidad Católica Sedes Sapientiae. Asimismo, fue recopilada la información necesaria con relación al tema de investigación.
- b. La selección de las semillas y la siembra de la “alfalfa” para la germinación fue realizada en un pequeño tinglado ubicado dentro del campus de la universidad.
- c. El trasplante de las plantas de “alfalfa” a las macetas definitivas fue hecho a los 40 días después de la siembra, instalándose el material experimental a un costado del tinglado para poner a las plantas en contacto directo con las condiciones ambientales del lugar (ver Apéndice 8).

#### **Fase de campo**

En esta fase fueron ejecutadas las siguientes actividades:

##### **a. Preparación de los semilleros (almacigo)**

Los semilleros fueron preparados utilizando una mezcla de tierra agrícola arenosa y estiércol de cuy en una relación 5:1, a la vez fueron mezcladas para dejar un sustrato uniforme; donde se sembraron tres semillas por cada casilla de la bandeja de germinación (ver Apéndice 8). El lapso de permanencia de las plántulas en la bandeja fue de 40 días para luego ser trasplantadas, previa selección, a las macetas de 5 kg de capacidad y en las cuales fueron

tomadas todos los datos requeridos en la investigación a los 45 y 90 días después de la instalación definitiva del proceso de investigación, metodología utilizada y adaptada de Bonilla (2013) y González *et al.* (2018).

Una vez instaladas las plantas en las macetas de experimentación, estas fueron irrigadas diariamente durante el periodo de crecimiento de acuerdo con la capacidad de campo y el agua que se utilizó para los riegos fue proveniente del sistema de agua de pozas con que cuenta la Facultad, la misma que fue analizada tanto en sus propiedades físicas como químicas (ver Apéndice 7).

El suelo agrícola que se utilizó fue tomado de una de las parcelas que posee la Facultad teniéndose en cuenta el tipo de abonamiento y de fertilización recibidas y en los cuales se aplicaron las cantidades de nitrato de plomo  $[Pb(NO_3)_2]$  de acuerdo a los tratamientos considerados en este estudio.

#### **b. Exposición de las plantas a suelos con diferentes concentraciones de plomo**

La exposición de las plantas en los suelos contaminados con plomo fue en maceteros de 5 kg de capacidad, donde la evacuación del agua de exceso fue controlada para evitar el deterioro de las raíces y la falta de oxígeno. En cada macetero fueron colocadas seis plántulas debidamente seleccionadas teniéndose en cuenta la germinación y el desarrollo normal sin la presencia de plagas y enfermedades (ver Apéndice 8).

El plomo fue aplicado en forma de nitrato de plomo  $[Pb(NO_3)_2]$  disuelto en agua destilada en la cantidad requerida por cada tratamiento y luego añadidos en los maceteros. Los materiales y la solución plomo-agua fueron preparados en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agraria Filial Huaura de la Universidad Católica Sedes Sapientiae y luego trasladados posteriormente al costado del tinglado, donde se mantuvieron las macetas en contacto con el medio ambiente durante toda la fase experimental, metodología utilizada adaptada de Bonilla (2013) y González *et al.* (2018).

## **Fase de laboratorio**

### **a. Análisis de suelo**

Previo al inicio de la investigación, fue realizado un análisis del suelo utilizado como sustrato para saber los niveles de plomo (ver Apéndices 3 y 4), a la vez conocer la clase textural, rangos de pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica del suelo en estudio, estos análisis fueron ejecutados en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae. También se realizó un análisis completo del agua que se utilizó en el experimento (ver Apéndice 7), esta labor fue hecha en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

### **b. Cuantificación de plomo en la “alfalfa”**

La cuantificación del plomo correspondió a plantas con exposición a este elemento con 70, 140 y 210 mg.kg<sup>-1</sup> de plomo y monitoreadas a los 45 y 90 días, las mismas que fueron comparadas con un tratamiento testigo (0 mg.kg<sup>-1</sup> de plomo). Dicha cuantificación fue ejecutada por triplicado en plantas seleccionadas que fueron extraídas del sustrato de forma aleatoria, lavadas para eliminar el exceso de tierra y secadas en la estufa a 105 °C, para el respectivo análisis de laboratorio (ver Apéndice 8). La evaluación de las muestras tanto en la raíz como en la parte aérea de la planta fue hecha en forma independiente, así como también en el contenido de plomo en el suelo de cada uno de los tratamientos en estudio.

Como parte de la evaluación de la capacidad fitorremediadora de la “alfalfa”, fueron consideradas las siguientes características:

- Contenido de plomo, pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica del sustrato utilizado en la investigación fueron analizados en el Laboratorio de Biotecnología y Microbiología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (ver Apéndice 8).
- Características físicas y químicas del agua de riego que fue utilizado durante la experimentación (pH, salinidad, contenido de carbonato y sulfato, dureza y contenido de plomo), fueron analizadas en el Laboratorio de la UNALM.

- Contenido de plomo en la planta (tanto en las raíces como en la parte aérea) evaluado a los 45 y 90 días después de haber iniciado la parte experimental, en suelos con concentraciones de 0, 70, 140 y 210 mg.kg<sup>-1</sup> fueron analizadas en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Facultad de Ingeniería Agraria de la UCSS (Sede Lima).
- Como parte de un objetivo específico fue evaluado la altura en cm y el contenido de materia seca en gramos, tanto de las raíces, así como de la parte aérea (follaje).

## Fase de gabinete

En esta fase fueron ordenados los datos obtenidos en la fase de campo y de laboratorio para determinar la capacidad de absorción del plomo por la “alfalfa” mediante el análisis de la varianza de los tratamientos en estudio de acuerdo con el diseño estadístico completamente al azar (DCA), las medias fueron sometidas a la prueba de significación de Duncan. Con los datos obtenidos fueron ejecutados los análisis estadísticos respectivos, realizándose finalmente la redacción de la tesis para ser presentada a la comisión revisora para su evaluación y aprobación.

### 2.1.4. Tratamientos en estudio

Los tratamientos tomados en cuenta en el presente estudio son cuatro, los mismos que están mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2

*Niveles de plomo y etapas de evaluación en días por tratamiento*

| Tratamiento | Clave | Niveles de plomo en las unidades experimentales (mg.kg <sup>-1</sup> ) | Etapas de crecimiento (días) |
|-------------|-------|--|------------------------------|
| 1           | T1*   | 0 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb  | 45 y 90                      |
| 2           | T2    | 70 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb   | 45 y 90                      |
| 3           | T3    | 140 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb  | 45 y 90                      |
| 4           | T4    | 210 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb  | 45 y 90                      |

Fuente: Elaboración propia.

(\*) Testigo.

Las cantidades de plomo aplicados en cada uno de los tratamientos considerados en este estudio están indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3

*Tratamientos considerados en el estudio*

| Trata-<br>mientos | Niveles de<br>plomo<br>(mg.kg <sup>-1</sup> ) | Cantidad de<br>[Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]<br>(en mg*maceta de 5<br>kg) | Período de evaluación |         |
|-------------------|---|--|-----------------------|---------|
|                   |   |  | 45 días               | 90 días |
| 1                 | 0 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb*                  | 0,00   | X                     |         |
| 2                 | 70 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb                  | 559,65   | X                     |         |
| 3                 | 140 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb                 | 1 119,30   | X                     |         |
| 4                 | 210 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb                 | 1 678,95   | X                     |         |
| 1                 | 0 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb*                  | 0,00   |                       | X       |
| 2                 | 70 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb                  | 559,65   |                       | X       |
| 3                 | 140 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb                 | 1 119,30   |                       | X       |
| 4                 | 210 mg.kg <sup>-1</sup> de Pb                 | 1 678,95   |                       | X       |

Fuente: Elaboración propia.

(\*): Testigo.

### 2.1.5. Unidades experimentales

La investigación consideró 4 tratamientos incluido el control (T1), con 3 repeticiones haciendo un total de 12 unidades experimentales (cada unidad experimental estuvo representada por una maceta), distribuidos de tal manera como se explica en la siguiente tabla:

Tabla 4

*Distribución de las unidades experimentales*

| Repet. | Distribución de tratamientos<br>(45 días) |     |     |     | Distribución de tratamientos<br>(90 días) |     |     |     |
|--------|---|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
|        | I   | T1* | T2  | T3  | T4  | T1* | T2  | T3  |
| II     | T2  | T3  | T4  | T1* | T2  | T3  | T4  | T1* |
| III    | T3  | T4  | T1* | T2  | T3  | T4  | T1* | T2  |

Fuente: Elaboración propia.

(\*): Testigo.

### 2.1.6. Identificación de variables y su mensuración

Las variables consideradas en la investigación están expresadas en la Tabla 5.

Tabla 5

*Identificación de las variables y su mensuración*

| Variables  | Unidades            | Método                                      |
|--|---------------------|---|
| <b>1. Variable independiente (X):</b>                                |                     |   |
| - Niveles de plomo aplicados al suelo:                               |                     |   |
| X <sub>1</sub> : 0 mg de Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (Testigo) | mg.kg <sup>-1</sup> | Balanza analítica                           |
| X <sub>2</sub> : 70 mg de Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>          | mg.kg <sup>-1</sup> | Balanza analítica                           |
| X <sub>3</sub> : 140 mg de Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>         | mg.kg <sup>-1</sup> | Balanza analítica                           |
| X <sub>4</sub> : 210 mg de Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>         | mg.kg <sup>-1</sup> | Balanza analítica                           |
| <b>2. Variable dependiente (Y):</b>                                  |                     |   |
| a. Capacidad de extracción de la alfalfa:                            |                     |   |
| Y1: A los 45 días  | mg.kg <sup>-1</sup> | Fotometría                                  |
| Y2: A los 90 días  | mg.kg <sup>-1</sup> | Fotometría                                  |
| b. Factores de concentración:  |                     |   |
| Factor de bioconcentración   |                     | Ecuación de Lokeshwari y Chandrappa (2006). |
| Factor de translocación  |                     |   |
| <b>3. Variables intervinientes:</b>                                  |                     |   |
| - Textura  | %                   | Método FAO (2019)                           |
| - pH   | Rangos              | Potenciómetro                               |
| - Salinidad  | dS.m <sup>-1</sup>  | Salómetro                                   |
| - Materia orgánica   | %                   | Método de la mufla                          |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6 contiene los parámetros biométricos que adicionalmente han sido considerados en la evaluación de la investigación.

Tabla 6

*Parámetros biométricos considerados adicionalmente*

| Parámetros                             | Unidades | Método               |
|--|----------|----------------------|
| - Altura de plantas:                   |          |                      |
| A los 45 días                          | cm       | Regla graduada       |
| A los 90 días                          | cm       | Regla graduada       |
| - Materia seca:                        |          |                      |
| Materia seca radicular a los 90 días   | G        | Balanza de precisión |
| Materia seca del follaje a los 90 días | G        | Balanza de precisión |

Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.7. Diseño estadístico del experimento

Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante el diseño completamente al azar (DCA) considerándose cuatro tratamientos con tres repeticiones (cuatro tratamientos evaluados a los 45 días y 40 tratamientos evaluados a los 90 días). El diseño DCA compara los cuatro tratamientos considerando dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio, teniéndose en cuenta que este diseño se utiliza en investigaciones cuando las condiciones donde se desarrollan el experimento, así como el material a usarse es lo más homogéneo posible (Invernaderos, laboratorio, establos, tinglados). Para comparar las medias se utilizará la Prueba de Significación de Duncan ( $p \leq 0,05$ ), que es un procedimiento para realizar comparaciones múltiples de las medias, recomendándose su uso cuando la prueba de F haya resultado significativa (Little y Halls, 2002).

### 2.1.8. Análisis estadístico de datos

Los datos de las variables obtenidos en el estudio fueron analizados estadísticamente mediante el diseño completamente al azar (DCA) por medio del software Minitab 18, cuyo análisis de la varianza está señalada en la Tabla 7. Para comparar las medias se utilizará la Prueba de Significación de Duncan ( $p \leq 0,05$ ), procedimiento usado para realizar comparaciones múltiples de las medias, recomendándose su uso cuando la prueba de F haya resultado significativa (Little y Halls, 2002).

Tabla 7

*Esquema del análisis de la varianza*

| Fuente de variabilidad | GL        | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | F calculado |
|------------------------|-----------|-------------------|----------------|-------------|
| Tratamientos           | 3         |                   |                |             |
| Error experimental     | 8         |                   |                |             |
| <b>Total</b>           | <b>11</b> |                   |                |             |

*Fuente:* Elaboración propia.

### 2.1.9. Materiales

**Materiales de campo.** - Tinglado, semillas de “alfalfa”, bandejas de germinación, maceteros con de 5 kg de capacidad, mesa para el soporte de los maceteros, sustrato (tierra agrícola y

estiércol), agua de poza, regadera, regla graduada, nitrato de plomo, pala, tamiz, papel periódico, bolsas de papel, tablero, lápices, bolsas de plástico de 1 kg de capacidad.

**Materiales de laboratorio.-** Estufa, balanza digital, frascos de vidrio, placas petri, probeta, pipeta, micropipeta, varilla de vidrio, tubos de ensayo , gradilla porta tubos, tijeras, mortero, fotómetro (*pHotoflex* ® *STD*), kit de análisis para plomo, multiparámetro de la marca (*Hanna HI 9813-6*), agua destilada, agua desionizada, crisol de porcelana, pinza de crisol, ácido nítrico, papel aluminio, tamiz (450 micrómetro), frasco volumétrico de 50 ml, jeringa de 5 ml, gasa, guantes, toca, guardapolvo, cámara fotográfica, mascarilla.

**Materiales de gabinete.** - Laptop, calculadora, hoja de cálculo (Excel), cuaderno de apuntes, lapiceros, memoria externa (USB), Minitab 18 (Software estadístico), impresora, Word.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1. Análisis de los suelos, altura de planta y contenido de materia seca

En los análisis de los suelos se han considerado a la reacción del suelo, la conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica, los mismos que fueron realizados en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae.

#### 3.1.1. Reacción del suelo, conductividad eléctrica y materia orgánica

En la Tabla 8 se muestran los resultados de la reacción del suelo, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica y de plomo y la textura del sustrato:

Tabla 8

*Resultados del análisis del sustrato*

| Días<br>evaluación | pH<br>(1:1) | C.E.<br>(dS.m <sup>-1</sup> ) | M.O.<br>(%) | Plomo<br>(mg.kg <sup>-1</sup> ) | Textura (%) |      |         | Clase<br>Textural |
|--------------------|-------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|------|---------|-------------------|
|                    |             |                               |             |                                 | Arena       | Limo | Arcilla |                   |
| 45                 | 7,8         | 2,20                          | 1,40        | 17,98                           | 86          | 8    | 6       | Arena             |
| 90                 | 7,6         | 2,60                          | 2,19        |                                 |             |      |         | franca            |

*Fuente:* Elaboración propia.

#### 3.1.2. Altura y contenido de materia seca

La altura de plantas fue evaluada a los 45 y 90 días después de la siembra. Del mismo modo fue evaluado al final de la cosecha el contenido de materia seca tanto de las raíces como de la parte aérea (tallos y hojas). Los resultados de ambas características fueron variables y están mostrados en las siguientes Tablas.

## Altura de plantas a los 45 días (cm)

Los datos obtenidos de la altura de plantas a los 45 días fueron analizados estadísticamente, donde en el análisis de la varianza no se observa diferencia entre los cuatro tratamientos (Tabla 9). Del mismo modo la prueba de Duncan (Tabla 10 y Figura 6) indican que no hay diferencias entre los cuatro tratamientos estudiados.

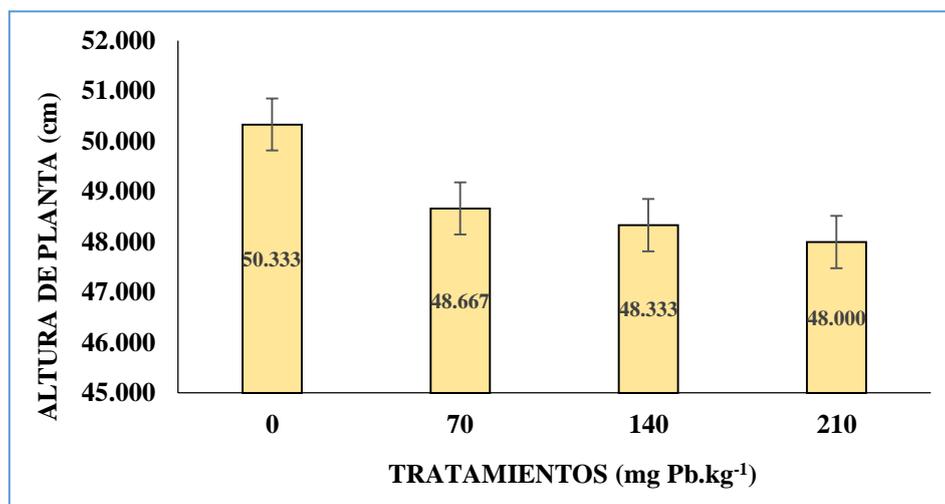


Figura 6. Altura de planta a los 45 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

*Análisis de varianza de la altura de planta (cm) a los 45 días*

| F. de V.           | GL | SC     | CM    | Fc    | p-valor |
|--------------------|----|--------|-------|-------|---------|
| <b>Tratamiento</b> | 3  | 9,667  | 3,222 | 0,758 | 0,5482  |
| <b>Error</b>       | 8  | 34,000 | 4,250 |       |         |
| <b>Total</b>       | 11 |        |       |       |         |

$\bar{x} = 48,833$

$S = 2,062$

$CV = 4,22 \%$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

*Prueba de significación de Duncan para la altura de planta a los 45 días*

| OM | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----|-------------|----------|---------------|
| 1  | 0 (Testigo) | 50,333   | A             |
| 2  | 70          | 48,667   | A             |
| 3  | 140         | 48,333   | A             |
| 4  | 210         | 48,000   | A             |

ALS (D) <sub>0,05</sub> = 4,12, 4,26, 4,33

Fuente: Elaboración propia.

## Altura de plantas a los 90 días

Los datos obtenidos de la altura de plantas a los 90 días fueron analizados estadísticamente, donde en el análisis de la varianza no se observa diferencia entre los cuatro tratamientos (Tabla 11). Del mismo modo la prueba de Duncan (Tabla 12 y Figura 7) indican que no hay diferencias entre los tratamientos estudiados.

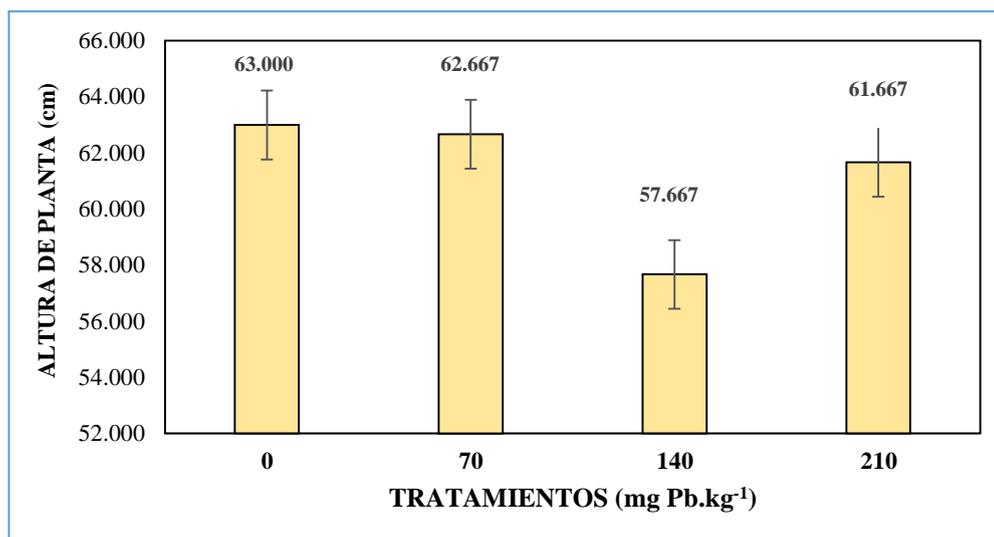


Figura 7. Altura de planta a los 90 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Análisis de varianza de la altura de plantas (cm) a los 90 días

| F. de V.           | GL | SC      | CM     | Fc    | p-valor |
|--------------------|----|---------|--------|-------|---------|
| <b>Tratamiento</b> | 3  | 54,250  | 18,083 | 1,808 | 0,2236  |
| <b>Error</b>       | 8  | 80,000  | 10,000 |       |         |
| <b>Total</b>       | 11 | 134,250 |        |       |         |

$\bar{X}$  = 61,25

S = 3,162

CV = 5,163 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Prueba de significación de Duncan para la altura de plantas a los 90 días

| OM       | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----------|-------------|----------|---------------|
| <b>1</b> | 0 (Testigo) | 63,000   | A             |
| <b>2</b> | 70          | 62,667   | A             |
| <b>3</b> | 210         | 61,667   | A             |
| <b>4</b> | 140         | 57,667   | A             |

ALS (D)<sub>0,05</sub> = 6,317, 6,536, 6,645

Fuente: Elaboración propia.

## Contenido de materia seca

El análisis de la varianza del contenido de la materia seca de la parte radicular de la “alfalfa” evaluado a los 90 días no muestra diferencia (Tabla 13). Del mismo modo la prueba de significación de Duncan también indica que no existe diferencia estadística entre los cuatro tratamientos estudiados (Tabla 14 y Figura 8).

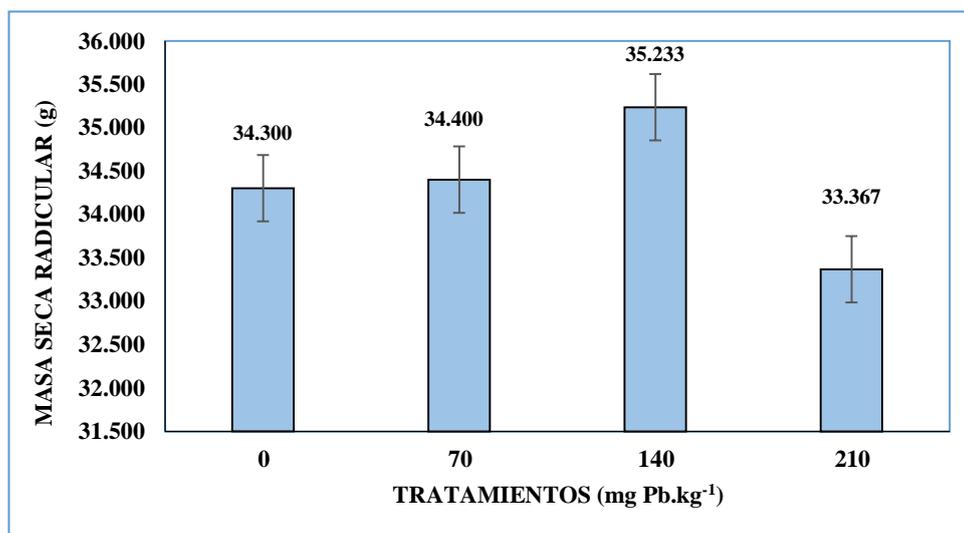


Figura 8. Materia seca radicular a los 90 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Análisis de varianza de la materia seca radicular (g) a los 90 días

| F. de V.            | GL | SC      | CM     | Fc    | p-valor |
|---------------------|----|---------|--------|-------|---------|
| <b>Tratamientos</b> | 3  | 5,249   | 1,750  | 0,070 | 0,974   |
| <b>Error</b>        | 8  | 198,773 | 24,847 |       |         |
| <b>Total</b>        | 11 | 204,023 |        |       |         |

$\bar{X}$  = 34,325

S = 4,948

CV = 14,522 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Prueba de significación de Duncan para la materia seca radicular (g) a los 90 días

| OM       | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----------|-------------|----------|---------------|
| <b>1</b> | 140         | 35,233   | A             |
| <b>2</b> | 70          | 34,400   | A             |
| <b>3</b> | 0 (Testigo) | 34,300   | A             |
| <b>4</b> | 210         | 33,367   | A             |

ALS (D)<sub>0.05</sub> = 9,958, 10,303, 10,476

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la varianza del contenido de la materia seca del follaje de la “alfalfa” evaluado a los 90 días no muestra diferencia (Tabla 15). Del mismo modo la prueba de significación de Duncan también indica que no existen diferencias estadísticas entre los cuatro tratamientos estudiados (Tabla 16 y Figura 9).

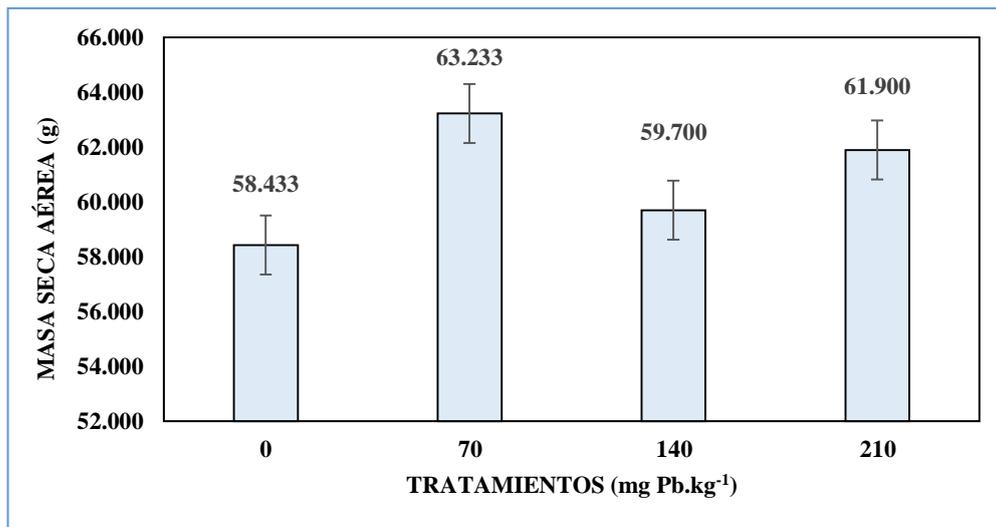


Figura 9. Materia seca del follaje a los 90 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Análisis de varianza de la materia del follaje (g) a los 90 días

| F. de V.            | GL | SC      | CM     | Fc    | p-valor |
|---------------------|----|---------|--------|-------|---------|
| <b>Tratamientos</b> | 3  | 41,823  | 13,941 | 0,324 | 0,8079  |
| <b>Error</b>        | 8  | 343,833 | 42,979 |       |         |
| <b>Total</b>        | 11 | 385,657 |        |       |         |

$\bar{X}$  = 60,817

S = 6,556

CV = 10,780 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Prueba de significación de Duncan para la materia seca del follaje a los 90 días

| OM | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----|-------------|----------|---------------|
| 1  | 70          | 63,233   | A             |
| 2  | 210         | 61,900   | A             |
| 3  | 140         | 59,700   | A             |
| 4  | 0 (Testigo) | 58,433   | A             |

ALS (D) <sub>0,05</sub> = 13,096, 3,550, 13,777

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Plomo absorbido por la “alfalfa” y remanente en el suelo

#### 3.2.1. Plomo absorbido por la “alfalfa” y remanente en el suelo a los 45 días

Los análisis estadísticos del plomo absorbido por la parte aérea y las raíces de la “alfalfa”, así como del plomo remanente en el suelo tanto a los 45 como a los 90 días, están expresados en las siguientes tablas y gráficos:

##### a. Plomo absorbido por el follaje a los 45 días

Los análisis de la varianza del plomo absorbido por el follaje (parte aérea) de la “alfalfa” a los 45 días indica una alta significación entre los tratamientos estudiados (Tabla 17). Asimismo, al realizarse la prueba de significación de Duncan se encontró una diferencia alta significación estadística, indicando que los tratamientos en estudio absorbieron en su parte aérea cantidades diferentes de plomo (Tabla 18 y Figura 10).

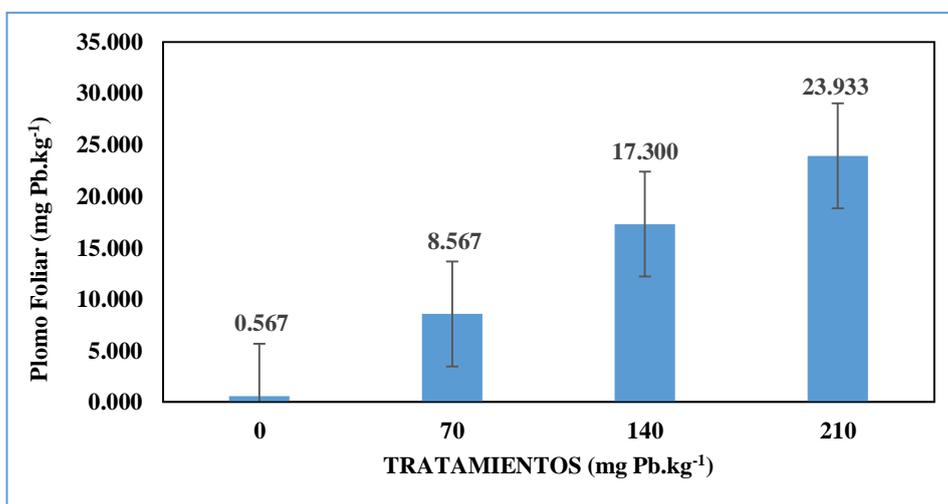


Figura 10. Pb contenido en el follaje (parte aérea) a los 45 días. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

Análisis de varianza de contenido Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 45 días

| F. de V.    | GL | SC      | CM      | Fc      | p-valor |
|-------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Tratamiento | 3  | 934,809 | 311,603 | 135,923 | <0,0001 |
| Error       | 8  | 18,340  | 2,292   |         |         |
| Total       | 11 | 953,149 |         |         |         |

$\bar{X}$  = 12,592      S = 1,514      CV = 12,025 %      Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18

Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en el follaje a los 45 días

| OM | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----|-------------|----------|---------------|
| 1  | 210         | 23,933   | A             |
| 2  | 140         | 17,300   | B             |
| 3  | 70          | 8,567    | C             |
| 4  | 0 (testigo) | 0,567    | D             |

ALS (D)  $_{0,05} = 3,024, 3,129, 3,181$

Fuente: Elaboración propia.

**b. Plomo absorbido por las raíces a los 45 días**

Los análisis de la varianza del plomo absorbido por las raíces de la “alfalfa” a los 45 días indican una diferencia alta entre los tratamientos estudiados (Tabla 19). Asimismo, al realizarse la prueba de significación de Duncan se encontró altas diferencias estadísticas, indicando que los tratamientos en estudio absorbieron en su parte radicular cantidades diferentes de plomo (Tabla 20 y Figura 11).

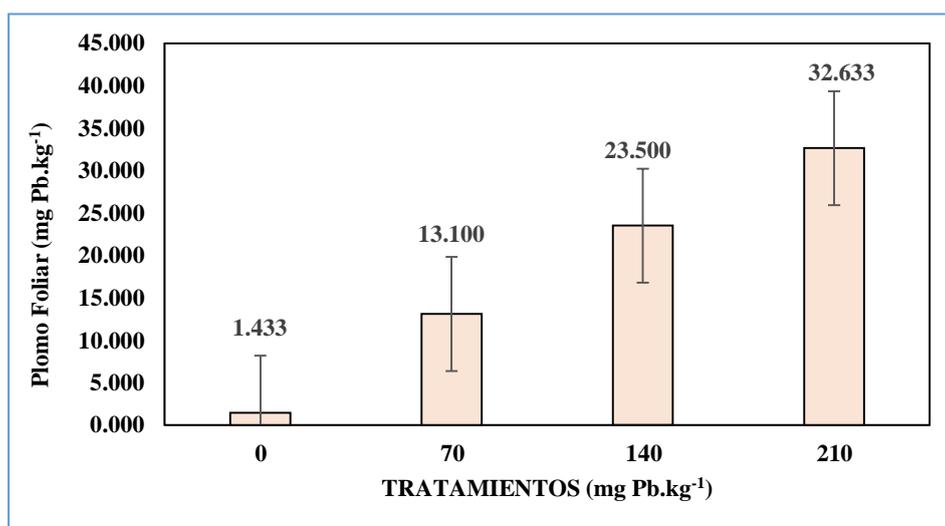


Figura 11. Contenido de Pb en la raíz a los 45 días, según los tratamientos aplicados Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19

*Análisis de variancia de contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 45 días*

| F. de V.    | GL | SC       | CM      | Fc     | p-valor |
|-------------|----|----------|---------|--------|---------|
| Tratamiento | 3  | 1627,213 | 542,404 | 83,329 | <0,0001 |
| Error       | 8  | 52,073   | 6,509   |        |         |
| Total       | 11 | 1679,287 |         |        |         |

$\bar{X}$  = 17,667

S = 2,551

CV = 14,441 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

*Prueba de significación de Duncan para contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 45 días*

| OM | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----|-------------|----------|---------------|
| 1  | 210         | 32,633   | A             |
| 2  | 140         | 23,100   | B             |
| 3  | 70          | 13,100   | C             |
| 4  | 0 (Testigo) | 1,433    | D             |

ALS (D)<sub>0,05</sub> = 5,096, 5,273, 5,362

Fuente: Elaboración propia.

### c. Plomo remanente en el suelo a los 45 días

Los análisis de la variancia del plomo remanente en el suelo a los 45 días indica una diferencia alta entre los tratamientos estudiados (Tabla 21). Asimismo, al realizarse la prueba de significación de Duncan se encontró altas diferencias estadísticas, indicando que en el plomo fue retenido en el suelo en cantidades diferentes (Tabla 22 y Figura 12).

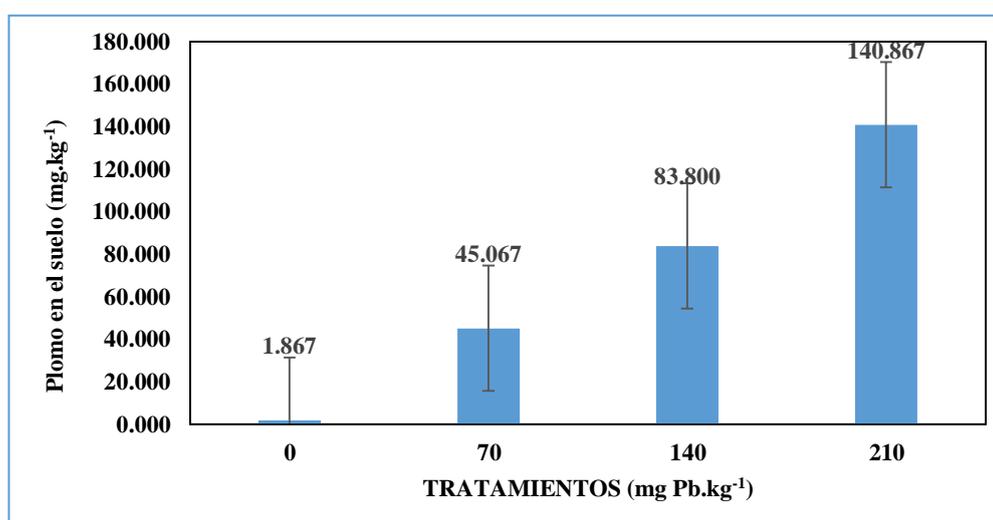


Figura 12. Contenido de Pb en el suelo a los 45 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21

*Análisis de varianza del contenido de Pb en el suelo a los 45 días*

| F. de V.           | GL | SC         | CM         | Fc      | p-valor |
|--------------------|----|------------|------------|---------|---------|
| <b>Tratamiento</b> | 3  | 31 376,120 | 10 458,707 | 747,317 | <0,0001 |
| <b>Error</b>       | 8  | 111,960    | 13,995     |         |         |
| <b>Total</b>       | 11 | 31 488,080 |            |         |         |

$\bar{X}$  = 67,900

S = 3,741

CV = 5,510 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

*Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb en el suelo a los 45 días*

| OM       | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----------|-------------|----------|---------------|
| <b>1</b> | 210         | 140,867  | A             |
| <b>2</b> | 140         | 83,800   | B             |
| <b>3</b> | 70          | 45,067   | C             |
| <b>4</b> | 0 (Testigo) | 1,867    | D             |

ALS (D)<sub>0.05</sub> = 7,473, 7,733, 7,862

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Plomo absorbido por la “alfalfa” y remanente en el suelo a los 90 días

El plomo absorbido por las plantas de “alfalfa” y el remanente en el suelo evaluados a los 90 días se muestran en las siguientes tablas y gráficos:

#### a. Plomo absorbido por el follaje a los 90 días

Los análisis de la varianza del plomo absorbido por el follaje de la “alfalfa” a los 90 días indican una diferencia alta entre los tratamientos estudiados (Tabla 23). Asimismo, al realizarse la prueba de significación de Duncan se encontró altas diferencias estadísticas, indicando que los tratamientos en estudio absorbieron en su parte foliar cantidades diferentes de plomo (Tabla 24 y Figura 13).

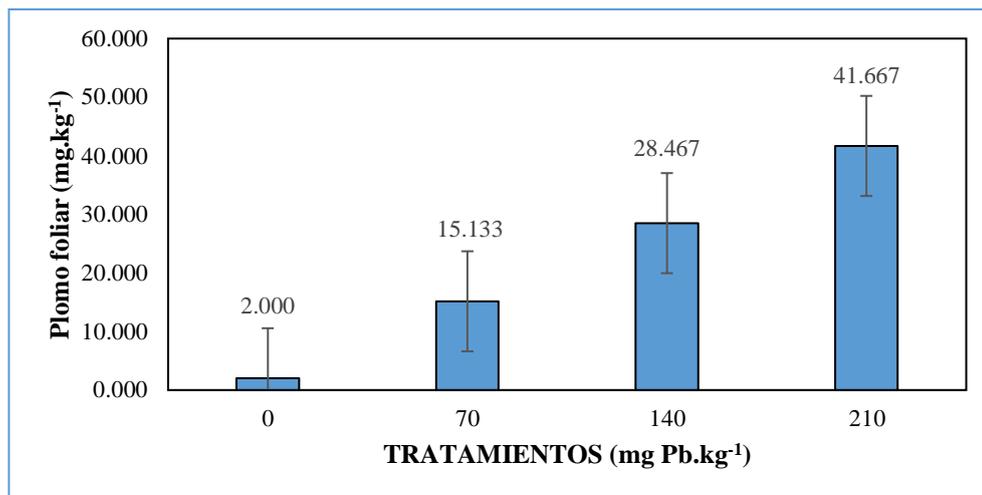


Figura 13. Contenido de Pb en la parte aérea a los 90 días, según los tratamientos aplicados.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Análisis de varianza del contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 90 días

| F. de V.           | GL | SC        | CM      | Fc     | p-valor |
|--------------------|----|-----------|---------|--------|---------|
| <b>Tratamiento</b> | 3  | 2 626,837 | 875,612 | 61,114 | <0,0001 |
| <b>Error</b>       | 8  | 114,620   | 14,328  |        |         |
| <b>Total</b>       | 11 | 2 741,457 |         |        |         |

$\bar{X}$  = 21,817

S = 3,785

CV = 17,350 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24

Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el follaje a los 90 días

| OM       | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----------|-------------|----------|---------------|
| <b>1</b> | 210         | 41,667   | A             |
| <b>2</b> | 140         | 28,467   | B             |
| <b>3</b> | 70          | 15,133   | C             |
| <b>4</b> | 0 (Testigo) | 2,000    | D             |

ALS (D)<sub>0,05</sub> = 7,561, 7,822, 7,953.

Fuente: Elaboración propia.

## b. Plomo absorbido por las raíces a los 90 días

Los análisis de la varianza del plomo absorbido por las raíces los 90 días mostraron diferencia alta entre los tratamientos estudiados (Tabla 25). Asimismo, al realizarse la prueba de significación de Duncan se encontró altas diferencias estadísticas, indicando que en el plomo fue retenido en el suelo en cantidades diferentes (Tabla 26 y Figura 14).

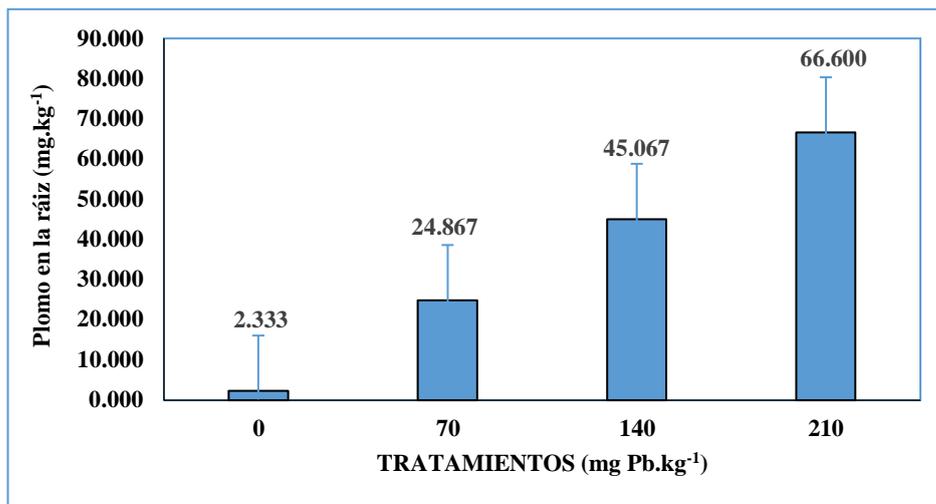


Figura 14. Contenido de Pb en la raíz a los 90 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25

Análisis de varianza del contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 90 días

| F. de V.           | GL | SC        | CM        | Fc      | p-valor |
|--------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| <b>Tratamiento</b> | 3  | 6 808,117 | 2 269,372 | 332.144 | <0,0001 |
| <b>Error</b>       | 8  | 54,660    | 6,833     |         |         |
| <b>Total</b>       | 11 | 6 862,777 |           |         |         |

$\bar{X}$  = 34,717

S = 2,614

CV = 7,529 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en la raíz a los 90 días

| OM | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----|-------------|----------|---------------|
| 1  | 210         | 66,600   | A             |
| 2  | 140         | 45,067   | B             |
| 3  | 70          | 24,867   | C             |
| 4  | 0 (Testigo) | 2,333    | D             |

ALS (D)<sub>0,05</sub> = 5,222, 5,402, 5,493

Fuente: Elaboración propia.

### c. Plomo remanente en el suelo a los 90 días

El análisis de la varianza del plomo remanente en el suelo a los 90 días indica una diferencia entre los tratamientos estudiados (Tabla 27). Asimismo, al realizarse la prueba de significación de Duncan se encontró altas diferencias estadísticas, indicando que en el plomo fue retenido en el suelo en cantidades diferentes (Tabla 28 y Figura 15).

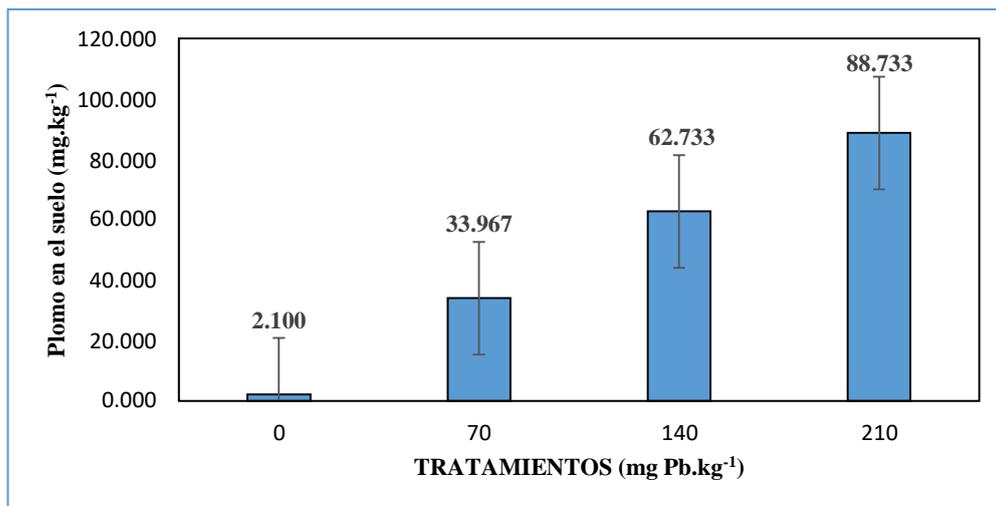


Figura 15. Contenido de Pb en el suelo a los 90 días, según los tratamientos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27

Análisis de varianza del contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el suelo a los 90 días

| F. de V.           | GL | SC         | CM        | Fc      | p-valor |
|--------------------|----|------------|-----------|---------|---------|
| <b>Tratamiento</b> | 3  | 12 525,097 | 4 175,032 | 352,026 | <0,0001 |
| <b>Error</b>       | 8  | 94,880     | 11,860    |         |         |
| <b>Total</b>       | 11 | 12 619,977 |           |         |         |

$\bar{X}$  = 46,883

S = 3,444

CV = 7,346 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28

Prueba de significación de Duncan para el contenido de Pb (mg.kg<sup>-1</sup>) en el suelo a los 90 días

| OM       | Tratamiento | Promedio | Significación |
|----------|-------------|----------|---------------|
| <b>1</b> | 210         | 88,733   | A             |
| <b>2</b> | 140         | 62,733   | B             |
| <b>3</b> | 70          | 33,967   | C             |
| <b>4</b> | 0 (testigo) | 2,100    | D             |

ALS (D)<sub>0.05</sub> = 6,878, 7,117, 7,236

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Factor de bioconcentración

#### a. Factor de bioconcentración (parte aérea y raíces)

Los factores de bioconcentración (parte aérea y radicular) obtenidos en la presente investigación están mostrados en las Figuras 16.

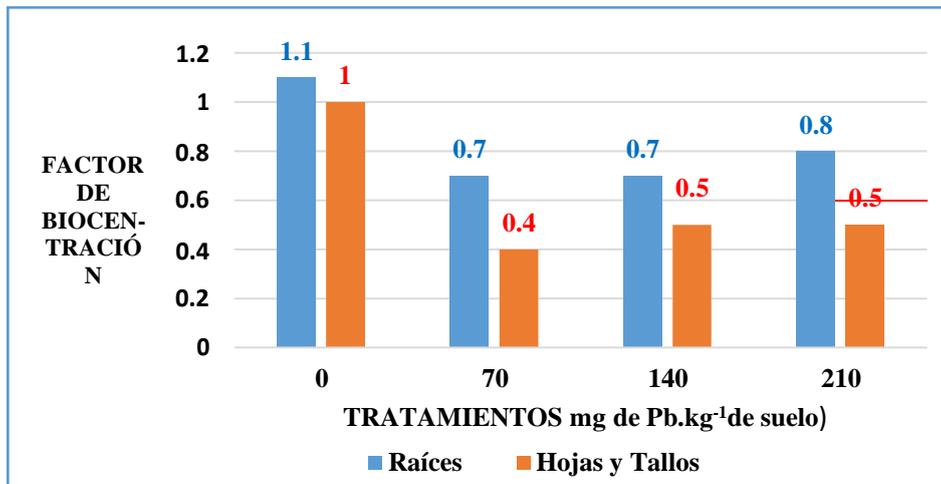


Figura 16. Factores de bioconcentración del Pb en las partes radicular y aérea de la “alfalfa”.

Fuente: Elaboración propia.

El factor de bioconcentración mostrado en la Figura 16 es muy variable, el mismo que se encuentra en valores menores a la unidad, a diferencia del caso del testigo (0 mg.kg<sup>-1</sup>) que en las raíces supera la unidad. Los resultados indican que la “alfalfa” es una planta *exclusora* de plomo.

#### b. Factor de translocación

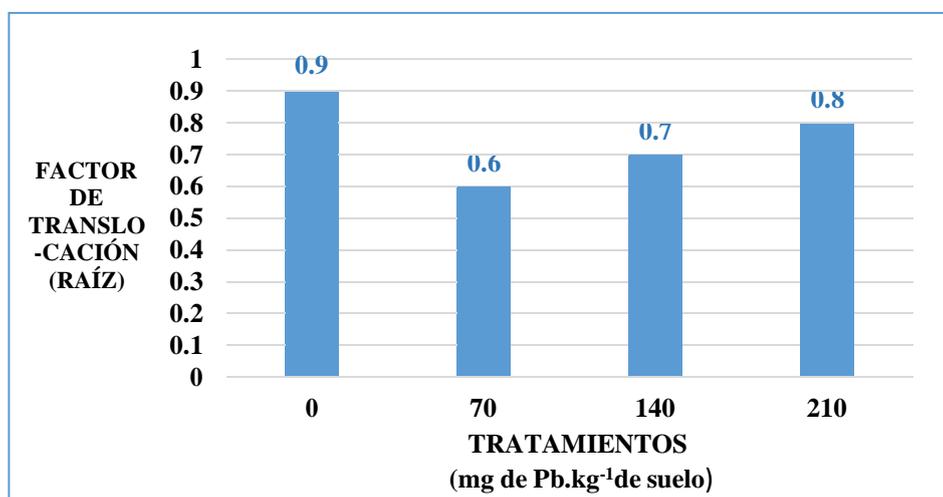


Figura 17. Factor de translocación del Pb en las partes aérea y radicular de la “alfalfa”.

Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, el factor de translocación, tal como se indica en la Figura.17 es variable con niveles que no sobrepasa la unidad, por lo tanto, las plantas de la “alfalfa” no son acumuladoras de plomo, sino debido a que tienen una más alta concentración en las raíces sobre una menor concentración en sus órganos aéreos, son consideradas como plantas *fito-estabilizadoras* antes que fitoextractoras, en concordancia con lo señalado por Audet y Charest (2007).

## CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

### 4.1. Análisis del sustrato (suelo), altura de planta y contenido de materia seca

#### a. Reacción del suelo

De acuerdo con los resultados del análisis de los suelos en estudio se ha encontrado que el pH tanto al inicio como al final del experimento tuvo una ligera variación de 7,8 a 7,6, correspondiendo ambos a un pH ligeramente básico, cuya variación es posible que sea debido a la descomposición de la materia orgánica aplicada al sustrato al momento de la siembra de la “alfalfa”. Es conveniente tener en cuenta lo reportado por Bonilla (2013) en el sentido de que el pH es un factor esencial para la disponibilidad de la mayoría de los metales pesados, especialmente cuando el medio es ácido. A lo que se suma el criterio de De la Peña (2014) quién afirma que los factores que tienen un significativo efecto en la disponibilidad y absorción del plomo son el pH y el contenido de materia orgánica.

#### b. Conductividad eléctrica

En cuanto a la conductividad eléctrica se encontró que esta propiedad está en un nivel de ligeramente salino (de 2,2 a 2,60 dS.m<sup>-1</sup>), lo cual tendrá un efecto negativo especialmente en los cultivos muy sensibles a la presencia de sales, notándose claramente que esta salinidad se incrementó al final del experimento. Es posible que el estiércol que se ha adicionado a la parcela de donde se tomó el material para preparar el sustrato y el agua de riego utilizado, hayan contribuido a este aumento que en general no representa riesgo para la mayoría de las plantas cultivadas. Los datos obtenidos por Ventocilla (2015) al hacer un estudio de los suelos de Medio Mundo, Végueta, son similares, quién además señala que en algunos casos puede haber riesgos de salinidad al no considerar un buen uso y manejo de los fertilizantes y del agua de riego.

### **c. Contenido de materia orgánica**

La materia orgánica al inicio del experimento estuvo en niveles bajos ( $14,0 \text{ g.kg}^{-1}$ ) y posteriormente al final del experimento aumento a un nivel medio de  $21,9 \text{ g.kg}^{-1}$ , debido a que, al prepararse el sustrato para el estudio se le adicionó materia orgánica en forma de estiércol de “cuy”, el mismo que ha ido descomponiéndose muy lentamente e incrementando el contenido de la materia orgánica en el sustrato. Con respecto al contenido de materia orgánica se hace necesario tener en cuenta una vez más lo reportado por De la Peña (2014), quién afirma que los factores que tienen un efecto importante en la disponibilidad y absorción del plomo son el pH que controla la disponibilidad de los elementos químicos y el contenido de materia orgánica, especialmente en la forma de humus porque es parte constituyente del complejo arcillo húmico del suelo, responsable de la retención de cationes. Al respecto, Bonilla (2013) agrega que las plantas absorben mayor cantidad de plomo cuando el suelo tiene mayor cantidad de materia orgánica.

### **d. Textura del suelo**

En el presente estudio la textura del sustrato utilizado en el cultivo de la “alfalfa”, correspondiendo a una clase textural de arena franca con un predominio alto de la fracción arena, y con cantidades mínimas de arcillas como es la característica de los suelos de la zona en estudio. Por tal razón, se asume que estos suelos están dentro del tipo de suelos gruesos o ligeros, con poca capacidad de retención del agua y con una excesiva lixiviación tal como señala Ventocilla (2015). Asimismo, se debe tener en cuenta que de acuerdo con Bonilla (2013) las propiedades físicas del suelo favorecen la entrada e infiltración de los metales pesados, la arcilla tiende a adsorber metales pesados que están retenidos en el complejo de cambio, mientras que los suelos arenosos no tienen esta capacidad, lo cual es confirmada por Ventocilla (2015) al señalar que los suelos de la zona de Végueta se caracterizan por tener una textura gruesa.

### **e. Altura de plantas**

#### **Altura de plantas a los 45 días**

Con respecto a la altura de las plantas a los 45 días no se observa diferencia entre tratamientos en el presente estudio, lo cual indica que los tratamientos consistentes en

cuatro niveles de plomo incluido el testigo (T1) no han tenido influencia significativa directa sobre el crecimiento de las plantas dando a entender que ha predominado el factor genético sobre los niveles de plomo estudiados, aunque hay ciertas diferencias numéricas que varían de 48 a 50,333 cm, se confirma la igualdad estadística de los tratamientos en estudio.

### **Altura de plantas a los 90 días**

La altura de plantas a los 90 días antes de la cosecha, donde no se observa significación estadística entre tratamientos, lo cual indica que los tratamientos considerados en este estudio, en los cuales se estudiaron cuatro niveles de plomo (0, 70, 140 y 210 mg.kg<sup>-1</sup>), no han tenido diferencia sobre el crecimiento de las plantas, dando a entender que ha predominado el factor genético sobre el efecto de los niveles de plomo estudiados aunque se nota claramente que al aumentar el contenido de plomo en el suelo, la altura de las plantas ha disminuido ligeramente, aunque hay ciertas diferencias numéricas, se confirma la igualdad estadística en cuanto a la altura de plantas medidas a los 90 días después de la siembra.

La altura de plantas tanto a los 45 como a los 90 días no llegaron al tamaño ideal para la especie, notándose una disminución en la altura final, probablemente ocasionado por el estrecho espacio que tenían las macetas para el desarrollo normal del sistema radicular de las plantas. Además, es posible tener en cuenta lo reportado por García (2006) quién considera que el plomo inhibe la germinación de las semillas y retarda el crecimiento y desarrollo de las plantas por ser tóxico cuando se encuentra en mayores concentraciones. Sierra (2006) agrega que, en suelos contaminados con plomo, el desarrollo de las plantas es afectado.

### **f. Contenido de materia seca**

#### **Materia seca radicular a los 90 días**

Los resultados del análisis de la varianza del contenido de materia seca radicular a los 90 días después de iniciado el experimento, no se observa diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, debido probablemente a que en esta característica ha predominado el factor genético sobre el efecto de los niveles de plomo estudiados, aunque

el tratamiento con 140 mg.kg<sup>-1</sup> (T3) alcanzó un mayor peso con 35,233 mg.kg<sup>-1</sup> y el tratamiento con 210 mg.kg<sup>-1</sup> de plomo por kg de suelo (T4) solo tuvo un promedio de 33,367 mg.kg<sup>-1</sup>.

### **Materia seca de la parte aérea a los 90 días**

En el análisis de varianza de la materia seca de la parte aérea (Follaje) a los 90 días después iniciado el experimento, no se observó significación estadística entre tratamientos, indicando que los tratamientos considerados en este estudio no son diferentes estadísticamente, dando a entender de que en esta característica ha predominado el factor genético de la “alfalfa” sobre el efecto de los niveles de plomo estudiados, tal como sucedió con la materia seca radicular. Aunque se notaron diferencias numéricas en el contenido de materia seca, donde el tratamiento con 70 mg.kg<sup>-1</sup> (T3) alcanzó un mayor contenido con 63,23 mg.kg<sup>-1</sup> y el tratamiento testigo con 0 g.kg<sup>-1</sup> solo tuvo un promedio de 58,433 mg.kg<sup>-1</sup>.

Aunque no se ha encontrado significación estadística en el análisis del contenido de materia seca tanto de la parte radicular como la parte aérea, se podría asumir que estos contenidos en cierto modo habrían sido afectados por el plomo presente en el suelo, sobre todo teniéndose en cuenta lo reportado por García (2006) y Sierra (2006) quienes afirman que niveles de plomo en el suelo afectan el normal desarrollo de las plantas y consecuentemente también podrían tener un efecto negativo sobre contenido de materia seca.

## **4.2. Plomo absorbido por la “alfalfa” y remanente en el suelo a los 45 y 90 días**

### **4.2.1. Plomo absorbido a los 45 días**

#### **a. Plomo absorbido por el follaje (parte aérea) de la “alfalfa” a los 45 días**

En el contenido plomo absorbido por el follaje de la “alfalfa” a los 45 días después iniciado el experimento se observó una alta significación estadística entre tratamientos, indicando que los tratamientos estudiados absorbieron al plomo de acuerdo con la mayor disponibilidad en el suelo, donde el tratamiento (T4) con 210 mg.kg<sup>-1</sup> alcanzó una mayor

absorción equivalente a peso con  $23,953 \text{ mg.kg}^{-1}$ , superando ampliamente al tratamiento testigo (T1) que solo alcanzó una absorción de  $0,567 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Los resultados obtenidos tienen algo de similitud con lo reportado por Bonilla (2012), quien al comparar la capacidad fitorremediadora del amaranto, la “alfalfa” y el perejil, encontró que la “alfalfa” a los 30 días extrajo una cantidad superior equivalente a  $171 \text{ mg.kg}^{-1}$  de Pb.

#### **b. Plomo absorbido por las raíces de la “alfalfa” a los 45 días**

En el contenido de plomo absorbido por las raíces de la “alfalfa” a los 45 días después de iniciado el experimento, se observó una alta significación estadística entre tratamientos, indicando que los tratamientos estudiados absorbieron al plomo de acuerdo con la mayor disponibilidad en el suelo, notándose diferencias estadísticas altamente significativas, donde el tratamiento con  $210 \text{ mg.kg}^{-1}$  (T4) alcanzó una mayor absorción con  $32,633 \text{ mg.kg}^{-1}$ , superando ampliamente al tratamiento testigo (T1) con  $0 \text{ g.kg}^{-1}$  que solo alcanzó un promedio de  $1,433 \text{ g}$  de plomo absorbido por un  $\text{kg}$  de suelo. De manera general, las raíces absorbieron mayor cantidad de plomo a los 45 días, lo cual se confirma con lo reportado por Gonzales *et al.* (2018), quienes al hacer un estudio de la capacidad fitoextractora de la “alfalfa” en suelos contaminados con cobre encontraron que la mayor acumulación se dio en las raíces de las plantas.

#### **c. Plomo remanente en el suelo a los 45 días**

En el contenido de plomo remanente en el suelo a los 45 días después iniciado el experimento, se observó una alta significación estadística entre tratamientos e indicando que los suelos adsorbieron plomo de acuerdo con la mayor disponibilidad de este elemento. La prueba de Duncan indica que hay diferencias estadísticas altamente significativas, observándose que el tratamiento con  $210 \text{ mg.kg}^{-1}$  (T4) alcanzó la mayor retención del plomo con  $140,867 \text{ mg.kg}^{-1}$ , equivalente al  $66 \%$  de plomo agregado al suelo, superando ampliamente al tratamiento testigo con  $0 \text{ g.kg}^{-1}$  (T1) que solo alcanzó un promedio de  $1,867 \text{ g}$  de plomo absorbido en un  $\text{kg}$  de suelo. Estos resultados demuestran que la “alfalfa” no extrajo todo el plomo en un periodo corto de 45 días, lo cual tiene cierta relación con los resultados obtenidos por Peixoto (2018) quién reporta que la “alfalfa” mostró una capacidad extractora de  $49 \%$ , en un periodo de dos meses.

#### **4.2.2. Plomo absorbido a los 90 días**

##### **a. Plomo absorbido por el follaje (parte aérea) de la “alfalfa” a los 90 días**

En los resultados del análisis de la varianza de la cantidad de plomo absorbido por el follaje de la “alfalfa” a los 90 días después iniciado el experimento, se observó una alta significación estadística entre tratamientos, indicando que los tratamientos estudiados absorbieron al plomo de acuerdo con la mayor disponibilidad de este elemento en el suelo. La prueba de significación de Duncan muestra diferencias estadísticas altamente significativas, donde el tratamiento con 210 mg.kg<sup>-1</sup> (T4) absorbió una mayor cantidad de plomo con 41,667 g superando ampliamente a los otros tratamientos, donde el tratamiento testigo (T1) con 0 g.kg<sup>-1</sup> solo absorbió 2,0 g de plomo en un kg de suelo. Los resultados obtenidos guardan mucha relación con lo reportado por Bonilla (2012), quien encontró que la “alfalfa” en su parte aérea extrajo casi el doble Pb de lo que extrajo a los 30 días.

##### **b. Plomo absorbido por las raíces de la “alfalfa” a los 90 días**

En los resultados del análisis de la varianza del contenido de plomo absorbido por las raíces de la “alfalfa” a los 90 días, se observó una alta significación estadística entre tratamientos confirmándose de esta manera que los tratamientos estudiados absorbieron al plomo de acuerdo con la mayor disponibilidad en el suelo. En la prueba de Duncan se nota que hay diferencias estadísticas altamente significativas donde el tratamiento con 210 mg.kg<sup>-1</sup> (T4) alcanzó una mayor absorción con 66,6 mg.kg<sup>-1</sup>, superando ampliamente a los demás tratamientos, ocupando el último lugar el tratamiento testigo con 0 g.kg<sup>-1</sup> (T1) que solo alcanzó un promedio de 2,333 g de plomo absorbido por kg de suelo. Se puede afirmar que las raíces también absorbieron mayor cantidad de plomo a los 90 días, lo cual tiene relación con lo reportado por Gonzales *et al.* (2018), quienes al hacer un estudio de la capacidad fitoextratora de la “alfalfa” en suelos contaminados encontraron que la mayor acumulación del contaminante se encontró en el sistema radicular de las plantas.

### **c. Plomo remanente en el suelo a los 90 días**

En los resultados del análisis de la varianza del contenido de plomo remanente en el suelo a los 90 días después iniciado el experimento, se observó una alta significación estadística entre tratamientos, indicando que los suelos retuvieron al plomo de acuerdo con la mayor disponibilidad de este elemento. La prueba de Duncan indica la existencia de diferencias estadísticas altamente significativas, donde el tratamiento con 210 mg.kg<sup>-1</sup> (T4) alcanzó la mayor retención del plomo con 88,733 mg.kg<sup>-1</sup>, superando ampliamente a los demás tratamientos, quedando en último lugar el tratamiento testigo con 0 g.kg<sup>-1</sup> que solo tiene un promedio de 2,1 g de plomo absorbido en un kg de suelo. Estos resultados también demostraron que la “alfalfa” no extrajo todo el plomo presente en el suelo en un periodo corto de 90 días, lo cual tiene cierta relación con los resultados obtenidos por Peixoto (2018) quien reporta que la “alfalfa” mostró una capacidad extractora del 47 % del plomo presente en el suelo, en un periodo de tres meses.

También es importante tenerse en cuenta que los resultados obtenidos sobre la absorción del plomo tanto por las raíces como por la parte aérea son similares a las conclusiones reportados por Raya (2014) quien encontró en un ensayo de campo que la “alfalfa” había extraído un promedio de 62,33 mg.kg<sup>-1</sup> de plomo en suelos con alta concentración de este elemento y un promedio de 8,29 mg.kg<sup>-1</sup> en suelos con menor concentración. Del mismo modo, Palacios (2010) y González *et al.* (2018) señalan que las raíces de la “alfalfa” acumularon una mayor cantidad de plomo con relación al follaje,

### **4.3. Factor de bioconcentración**

#### **a. Factor de bioconcentración en la parte radicular y follaje de la “alfalfa”**

Al hacer el cálculo de factor de bioconcentración, en la parte radicular de la “alfalfa”, se ha encontrado que solamente en el tratamiento testigo con 0 mg de Pb añadido, tiene un valor superior a 1, mientras que los demás tratamientos que recibieron 70, 140 y 210 mg de plomo por kg de sustrato tienen factores de bioconcentración por debajo de 1 respectivamente. Del mismo modo el factor de bioconcentración calculado para la parte aérea de la planta, tiene un efecto similar, ya que solamente el tratamiento testigo alcanza

un promedio de 1, mientras que los demás tratamientos tienen el factor por debajo de 1, indicando que la “alfalfa” no es una planta *hiperacumuladora* sino que es una planta *exclusora* de plomo, por tener el factor de bioconcentración, tanto en las raíces como la parte aérea con un valor menor que 1, lo cual está claramente explicado por Audet y Charest (2007).

#### **b. Factor de translocación**

Finalmente, se observa que el factor de translocación calculado a partir del cociente entre la concentración del plomo en los órganos aéreos y la parte radicular, encontrándose valores que no superaron a 1, por lo tanto las plantas de la “alfalfa” no son acumuladoras de plomo debido a que tienen una más alta concentración de Pb en las raíces sobre una menor concentración en sus órganos aéreos, siendo consideradas como plantas *fito-estabilizadoras* antes que fitoextractoras, en concordancia con lo señalado por Audet y Charest (2007). Asimismo, Lokeshwari y Chandrappa (2006) agregan que si el factor de translocación es mayor de uno ( $>1$ ) indica una gran capacidad para transportar metales desde las raíces a los órganos aéreos de la planta. Esta condición es característica de las plantas hiperacumuladoras que tienen una relación de concentración de metal de la parte aérea/concentración de metal en la raíz, mayor a 1. Al contrario, las plantas no acumuladoras tienen una mayor concentración de metal en las raíces y menor concentración en hojas y tallos.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Con respecto a los análisis del suelo utilizado en el trabajo de investigación se concluye que el pH es variable (7,8 a los 45 días y 7,6 a los 90 días) y está dentro del rango de suelos ligeramente básicos a lo que se suma el bajo a medio contenido de materia orgánica (1,4 % a los 45 días y 2,19 % a los 90 días) que no permiten la liberación de los iones metálicos pesados y no sean fácilmente absorbidos por las plantas. En cuanto a la salinidad, por estar en niveles bajos (2,2 dS.m<sup>-1</sup> a los 45 días y 2,6 dS.m<sup>-1</sup> a los 90 días) no tienen efecto alguno en la absorción de los metales pesados. Asimismo, al tener los suelos una textura gruesa (Arena franca) puede facilitar el movimiento hacia las capas profundas de los metales pesados por lixiviación.
2. Al evaluarse la altura de las plantas, tanto a los 45 días (de 48,00 a 50,33 cm) como a los 90 días (57,6 a 63,0 cm), también fueron variables entre los tratamientos estudiados, no se encontraron diferencias estadísticas, pero si diferencias numéricas, indicando de esa manera que, a mayores concentraciones de plomo, la altura de plantas es afectada en cierto modo. Algo similar sucede con el contenido de la materia seca evaluada a los 90 días (33,367 a 35,233 g en las raíces y 58,433 a 63,233 g en el follaje), ya que no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos estudiados, pero si se observó que el contenido de materia seca de las raíces fue inferior al de la parte aérea de las plantas de “alfalfa”.
3. Con referencia al plomo absorbido por la “alfalfa” y el remanente que quedó en el suelo se encontraron diferencias estadísticas muy notorias de la siguiente manera:
  - a. La extracción de plomo por la parte aérea de las plantas de la “alfalfa” a los 45 días fue de 0,567 a 23,933 mg.kg<sup>-1</sup> mostrando diferencias estadísticas significativas y de igual manera a los 90 días con una absorción de 2,0 a 41,667 mg.kg<sup>-1</sup>, demostrando de esta manera que, al aumentar el contenido de plomo en el suelo, también aumenta positivamente la absorción de este elemento con la

diferencia que la cantidad del metal absorbido es menor a los 45 días y mayor a los 90 día.

- b. La extracción del plomo por las raíces de las plantas de alfalfa sigue el mismo patrón que la absorción por la parte aérea y las cantidades absorbidas a los 5 días son menores a las cantidades absorbidas a los 90 días, indicándonos que cuanto mayor tiempo pasa la absorción del plomo es mayor. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la absorción del plomo por las raíces en los cuatro tratamientos estudiados es en mayor cantidad, que lo absorbido por la parte aérea de la alfalfa.
  - c. En cuanto a las cantidades de plomo remanente en el suelo después de las evaluaciones hechas a los 45 (1,817 a 140, 867 y 90 días (2,10 a 88,733 mg.kg<sup>-1</sup>) y teniendo en cuenta lo extraído tanto por la parte aérea como por las raíces, se asume que, en un periodo corto, como es el caso de las evaluaciones a los 45 días, hay un mayor remanente del metal pesado que cuando el periodo es más largo (90 días), indicando que a mayor tiempo habrá una mayor extracción del elemento contaminante.
4. Finalmente, al evaluarse el factor de bioconcentración mediante la comparación entre el factor de bioconcentración de la parte aérea y de la parte radicular dan valores menores de uno (de 0,4 a 1 en la parte aérea y de 0,5 a 1,0, con excepción de T1 (testigo), considerándose de esta manera que la “alfalfa” no es una planta hiperacumuladora sino exclusora del plomo. Del mismo modo, una vez determinado el factor de translocación que mostró valores que variaron de 0,6 a 0,9, en todos los tratamientos tienen valores menores de 1, indicando que la “alfalfa” es calificada como una planta fitoestabilizadora antes que fitoextractor

## **CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES**

1. Al haberse encontrado que los suelos en estudio se caracterizan por tener un pH ligeramente básico con contenidos medios en materia orgánica y con una textura gruesa con predominio de la fracción arena y con poco contenido de arcillas, se recomienda que en estudios similares se consideren suelos de pH ácido, con mayor contenido de materia orgánica y de textura fina o arcillosa, con la finalidad de facilitar la liberación del plomo disponible, teniéndose en cuenta que dichas propiedades tienen relación con la presencia del plomo en el suelo.
2. Del mismo modo, por ser esta investigación de tipo preliminar e introductoria en la zona, se recomienda que los periodos de evaluaciones se prolonguen, teniendo en cuenta los cortes que se hace a la “alfalfa” durante un año, con fin de obtener con mayor precisión la curva de extracción del plomo por la planta en periodos más amplios que ameriten datos más concretos.
3. También se recomienda hacer el mismo estudio en un campo definitivo, donde las condiciones ambientales y edafológicas son menos controladas, obteniéndose de esta manera una información mucho más real y precisa para ponerla al servicio de los agricultores y de los centros de investigación agrícola, con el fin de aprovechar con mayor eficacia las condiciones que tiene la “alfalfa” en la fitorremediación de tierras contaminadas con plomo.

## REFERENCIAS

- Agudelo, L. M., Macías, K. I., y Suárez, A. J. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de investigación*. 2 (1), 57-60. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520110.pdf>
- Alguacil, F., y Merino, Y. (1998). Biotratamiento de contaminantes de origen inorgánico. *Revista de metalurgia*. 34 (5), 428-436. Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/810/821>
- Álvarez, E., Fernández, M. L., Vaamonde, C., y Fernández, M. J. (2003). Heavy metals in the dump of an abandoned mine in Galicia and in the spontaneously occurring vegetation. *Science of The Total Environment*. 313 (1-3), 185-197. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12922070>
- Andrades, M., y Martínez, E. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. (3era ed.). España: Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267902>
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 02 de diciembre de 2017, pp. 12-15.
- Arellano, J., y Guzmán, J. E. (2011). *Ingeniería Ambiental*. (1era ed.). México D.F: Alfaomega Grupo Editor. Recuperado de <https://www.auditorlider.com/wp-content/uploads/2019/07/Ingenieria-Ambiental-Arellano.pdf>
- Audet, P., y Charest, C. (2007). Heavy metal phytoremediation from a metaanalytical perspective. *Environmental Pollution*, 147 (1), 231-237. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17045709>
- Avelino, C. G. (2013). *Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en Villa de Pasco*. (Tesis de Posgrado). Universidad Nacional del Callao, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/459>
- Baker, A. J., McGrath, S. P., Reeves, R. D., y Smith, J.A. (2000). Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. *Phytoremediation of contaminated soil and water*, 85-107.

- Banco Mundial. (2006). Análisis Ambiental del Perú: Retos para un desarrollo sostenible. *Banco Mundial Oficina de Lima, Perú*.
- Barber, S. A. (1995). *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach* (2nd ed.) (pp. 178-211). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Barrera, M. N. (2005). *Guía para el Manejo de Praderas de Alfalfa (Medicago sativa L.)*. (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria " Antonio Narro", Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/5810>
- Bonilla, S. M. (2013). *Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con Plomo, utilizando el método de fitorremediación*. (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4400/6/UPS-ST000985.pdf>
- Borges G. L., Escamilla B. A., Soria F. M., y Casanova V. V. (2005). Potasio en suelos de Yucatán. *Terra Latinoamericana*, 23 (4), 437-445. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311146002.pdf>
- Charles, W. M. (1997). Tendencias de metales pesados en los sedimentos de la llanura de inundación y el relleno del valle, río Lahn, Alemania. *Catena*, 39 (1), 53-68.
- Chávez, R. L. (2014). *Fitoremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2435>
- Cho, C., Yavuz, M., Park, S., y Sung, K. (2008). Effects of Grasses on the Fate of VOCs in Contaminated Soil and Air. *Water, air, and soil pollution*. 187(1-4), 243-250. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-007-9512-z>
- Coeto, J. (2017). La conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos. *Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura*, 1-5. Recuperado de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>
- De la Peña, C. V. (2014). *Evaluación de la concentración de plomo y cadmio en suelo superficial de parques y plazas públicas, en tres municipios del área Metropolitana de Monterrey*. (Tesis de grado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/4119/1/1080253816.pdf>

- Delgadillo, L. A., González R. C., Prieto G. F., Villagómez I. J., y Acevedo S. O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 14 (2), 597-612. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext)
- Diez, L. J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. (Tesis de posgrado). Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, España.
- Durán, C. P. (2011). *Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana*. (Tesis doctoral). Universidad de Barcelona, Barcelona, España. Recuperado de <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/36122>
- Encinas, M. D. (2011). *Medio ambiente y contaminación*. Principios Básicos. 1ra ed. Recuperado de <https://www.doccity.com/es/contaminacion-y-ambiente/4946715/>
- Environmental Protection Agency U.S. [USEPA] (1986). Air quality criteria for lead, Research Triangle Park, NC: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment, *Environmental Criteria and Assessment Office*. EPA 600-08-83-028F.
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XLI (2), 51-57.
- García, V. D. (2006). *Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de Zea mays L. expuestas a la toxicidad por plomo*. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España. Recuperado de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3676/dgv1de1.pdf?sequence=1>
- Garrido, V. S. (1993). *Interpretación de Análisis de Suelo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (5), 40. Recuperado de [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1993\\_05.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf)
- Gonzales, J., Del Pilar, A. M., Bustamante, E., y Chomba, J. (2018). Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el uso del cultivo de la alfalfa “*Medicago sativa*”. *Searching-Science*, 1 (1), 10-10.

- Harvey, P. J., Campanella, B. F., Castro, P. M., Harms, H., Lichtfouse, E., Schäffner, A. R. y Smrcek, S., y Werck, D. (2002). Fitorremediación de hidrocarburos poliaromáticos, anilinas y fenoles. *Environmental Science and Pollution Research*, 9 (1), 29-47.
- Huamaní, C. F. (2018). *Determinación del efecto de las aguas servidas sobre el suelo y cultivos en la desembocadura del canal de regadío de las Salinas Bajo-Chancay-Lima*. (Tesis de grado). Universidad Católica Sedes Sapientiae, Huacho, Perú. Recuperado de <http://repositorio.ucss.edu.pe/handle/UCSS/572>
- Huang, C. P. (1999). Environmental soil chemistry and human welfare 14° Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo. *Sociedad chilena de la ciencia del suelo*. Temuco, Chile.
- Ibáñez, J., Hernández, M., Doria, C., Fregoso, A., y Mohan, M. (2013). *Química Ambiental*. México D. F., México: Mc Graw-Hill Interamericana.
- International Plant Nutrition Institute [IPNI]. (1991). Formas y Estados de Potasio en el Suelo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* (4), 3-6.
- Jarsun, R. O. (2008). *Manual de uso e interpretación de aguas* (pp. 44-63). Córdoba, España: Gobierno de Córdoba, Secretaría de Ambiente.
- Kabata, A., y Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants* (pp. 102-112). Florida, USA: CRC Press LLC. Recuperado de <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/Trace-Elements-in-Soils-and-Plants.pdf>
- Labanda U. P., y Fernández G. C. (2012). Saturnismo: a propósito de un caso. *Medicina y Seguridad del trabajo*, 58(227), 168-173. Recuperado de <http://scielo.isciii.es/pdf/mesetra/v58n227/caso.pdf>
- León, I. M. (2016). *Evaluación de Medicago sativa L (alfalfa), Cecropia peltata L (guarumo) y Arachis pintoii W.C (maní forrajero) como potenciales especies fitorremediadoras para remediación de suelos contaminados por minería aurífera en las riberas del río Nambija, Barrio Puente Azul, Cantón Zamora*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Loja, Zamora, Ecuador.
- Ley General del Ambiente N° 26811. Ministerio del Ambiente. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 13 de octubre de 2005. pp. 12-13.

- Little, T. M., y Hills, F. J. (2002). *Métodos estadísticos para la Investigación en la Agricultura* (Cuarta reimpression). México D.F., México: Editorial Trillas S.A
- Liva, G. M., Alleyne, V. S., De Armas, G. T., Collazo, G. O., Jiménez, CH. J., Castro, E. D., Álvarez, P. M., Rodríguez, N. A., y González, B. R. (2013). Procedimiento analítico para la determinación de metales pesados en zanahoria y espinaca cultivadas en organopónicos urbanos. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 22 (1), 20-26. Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542013000100004&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542013000100004&script=sci_arttext&tlng=en)
- Lokeshwari, H., y Chandrappa, G. T. (2006). *Impact of heavy metal contamination of Bellandur Lake on soil and cultivated vegetation* (pp. 622-627). Current Science.
- López, A. (2007). Bioremediación y fitorremediación en suelos contaminados. *Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia*. 12, 598-615. Recuperado de <http://analesranf.com/mono/article/viewFile/598/615>
- López, O. J., y Contreras, G. E. (2017). *Estudio de factibilidad del uso de la fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el suelo usado como botadero a cielo abierto en Utopía-Yopal*. (Tesis de grado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- López, S., Gallegos, M. E., Pérez, L. J., y Gutiérrez, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 21 (2), 91-100. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992005000200091&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992005000200091&script=sci_abstract&tlng=en)
- Maguiña, C. L. (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, Lima, Perú. Recuperado de [http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1708/Magui%c3%b1a\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1708/Magui%c3%b1a_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Martell, M. N. (2014). *Acumulación de metales pesados en Beta vulgaris L. y Lolium perenne L. en suelos de Cuemanco*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de [https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis\\_martell\\_mendoza.pdf](https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_martell_mendoza.pdf)
- Medina, M. K., y Montano, CH. Y. (2014). *Determinación del factor de Bioconcentración y Traslocación de metales pesados en el Juncus arcticus Willd. y Cortaderia rudiusscula Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental Minero Alianza –*

*Ancash 2013*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1775>

Morua, R. N. (1997). *La alfalfa (Medicago sativa L.) sus principales plagas y enfermedades*. (Tesis de grado). División Agronomía. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. CID-UAAAN. Coahuila, México.

Ministerio de Agricultura [MINAG]. (2011). *Cadena Agroproductiva de Papa: Manejo y Fertilidad de Suelos*. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú. 48.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2016). Aprende a prevenir los efectos del mercurio Módulo 1: *Salud y ambiente*. Lima, Perú. Recuperado de <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/1568.pdf>

Nabulo, G., Black, C. R., y Young, S. D. (2011). Captación de metales traza por hortalizas tropicales cultivadas en suelo modificado con lodos de aguas residuales urbanas. *Environmental Pollution*, 159 (2), 368-376.

Neri, E. (2008). *Efectos Ambientales en la agricultura por el uso de aguas residuales del canal Chilhuacán*. (Postgrado). Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Postgrado de Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional, Puebla, México.

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] (2008). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Recuperado de <https://www.oefa.gob.pe/?wpfbdl=7827>

Organización Mundial de la Salud [OMS] (2018). *Intoxicación por plomo y salud*. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020). Manejo de suelos calcáreos. Recuperado de: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-calcareos/es/>

Oriundo, C. F, y Robles, J. T. (2009). *Determinación de plomo en suelos debido a la contaminación por fábricas aledañas al Asentamiento Humano cultura y progreso del distrito de Ñaña – Chaclacayo*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Mayor de San Marco, Lima, Perú.

- Ortiz, H. G., Trejo, R., Valdez, R. D., Arreola, J. G., Flores, A., y López, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus L.*) y micorrizas. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15 (2), 161-168.
- Palacios, A., Rodríguez, M. D., y Barajas, G. (2010). Tratamiento Electrostático (EPS) del Agua para Riego. *SynthesiS*, 3-8.
- Palacios, G. V. (2016). *Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (Medicago sativa) y perejil (Petroselinum crispum) en la remediación de suelos contaminados por plomo en el distrito de Anta – Carhuaz, 2016.* (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/925>
- Peixoto, E. F. (2018). *Rizofiltración de Alfalfa (Medicago sativa L.) y Coliflor (Brassica oleracea var. Botrytis), para tratamiento de suelos contaminados con cadmio y plomo, en San José de Parac (Huarochiri – Lima).* (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Pérez, N. I. (2014). Ácido-base: el equilibrio entre la química y práctica clínica. *Archivos de Neurociencias*, 19 (3), 164-165. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Ivan\\_PerezNeri/publication/288994482\\_Acido-base\\_el\\_equilibrio\\_entre\\_la\\_quimica\\_y\\_practica\\_clinica/links/56885d1108ae051f9af5c0b2/Acido-base-el-equilibrio-entre-la-quimica-y-practica-clinica.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ivan_PerezNeri/publication/288994482_Acido-base_el_equilibrio_entre_la_quimica_y_practica_clinica/links/56885d1108ae051f9af5c0b2/Acido-base-el-equilibrio-entre-la-quimica-y-practica-clinica.pdf)
- Plaster, E. (2005). *La Ciencia del Suelo y su Manejo* (pp. 405-419). 2da. Reimpresión. Madrid, España: Thompson Editores.
- Porta, J., López, M., y Roquero, C. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente* (3era ed.). Mundi Prensa.
- Pozo, I. M. (1977). *La alfalfa, su cultivo y aprovechamiento.* (2da ed.). Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Prieto, M. J., González, R. C., Román, G. A. y Prieto, G. F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1), 29-44. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., y Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution

in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*, 5(1-2), 149-155. Recuperado de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162006000100020&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162006000100020&script=sci_arttext)

Quiroga, A., y Bono, A. (2012). *Manual de fertilidad y evaluación de suelos* (pp. 405-419). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Ramos, T. A. (2019). *Efectos de la asociación simbiótica entre Rhizophagus intraradices y leguminosas nativas en el tratamiento de suelos contaminados con petróleo*. (Tesis de grado). Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú.

Raya, F. J. (2014). *Determinación de plomo en alfalfa (Medicago sativa), irrigada con aguas residuales*. (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”- Unidad Laguna – División de Carreras Agronómicas, Torreón, Coahuila, México. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/102>

Real Academia de Ingeniería (1994). Analitos. Recuperado de <http://diccionario.raing.es/es/lema/analito>

Real Academia de Ingeniería. (1994). Necromasa. Recuperado de <http://diccionario.raing.es/es/lema/necromasa>

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., y González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.

Robles, S. R. (1985). *Producción de granos y forrajes* (312-327). México D.F., México: Editorial Limusa.

Rodríguez, A., Cuéllar, L., Maldonado, G., y Suardiaz, M. (2016). Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35 (3), 251-271. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubinbio/cib-2016/cib163f.pdf>

Sanzano, A. (2006). *Fósforo del suelo*. Química del suelo. Recuperado de [http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo% 20del% 20Suelo. pdf](http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf)

Saxena, P. K. (1999). *Phytoremediation of heavy metal contaminated and polluted soil* (pp. 305-329). Ontario, Canadá: Prasad, M.N.V. and J.Hagemeyer.

- Schoeneberger, P., Wysocki, D., y Benham, E. (2012). *Field book for describing and sampling soils*. Lincoln, NE.: Natural Resources Conservation Service, USDA. National Soil Center.
- Sierra, M. (2005). *Niveles de metales pesados y elementos asociados en suelos de la provincia de Almería: Parámetros que los Afectan y Riesgos de Contaminación*. Granada, España: Editorial de la Universidad de Granada. Recuperado de <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/543/15344836.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sierra, R. (2006). *Fitorremediación de un suelo contaminado con plomo por actividad industrial*. (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Coahuila, México. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/271/T15921%20SIERRA%20VILLAGRANA,%20RUBEN%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
- Skoog, D., Holler, F., y Nieman, T. (2001). *Principios de análisis instrumental*. (5ta ed.). McGraw Hill/Interamericana de España. Recuperado de <https://docs.google.com/file/d/0B2XRAL9i98zvWXJVemJfcmMwX1E/edit>
- Solano, A. M. (2005). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc*. (Tesis doctoral). Universidad de Murcia, Murcia, España. Recuperado de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/11036?show=full>
- Soriano, S. (2003). *Importancia del cultivo de alfalfa (Medicago sativa L.) en el Estado de Baja California Sur*. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Coahuila, México. Recuperado de [http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1257/IMPORTANCIA%20DEL%20CULTIVO%20DE%20LA%20ALFALFA%20\(Mdicago%20sativa%20L.\)%20EN%20EL%20ESTADO%20DE%20BAJA%20CALIFORNIA%20SUR.pdf?sequence=1](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1257/IMPORTANCIA%20DEL%20CULTIVO%20DE%20LA%20ALFALFA%20(Mdicago%20sativa%20L.)%20EN%20EL%20ESTADO%20DE%20BAJA%20CALIFORNIA%20SUR.pdf?sequence=1)
- Sparks, D. L. (1998). *Environmental Soil Chemistry*. Chemistry of Soil Organic Matter (75-113). Newark, DE, USA: Academic Press.
- Universidad Católica Sedes Sapientiae (2017). Silbo Desarrollado de la Asignatura de Seminario de Tesis. Facultad de Ingeniería Agraria, Sede Huaura. FIAH/UCSS. Huaura, Lima, Perú.

- Vargas, M., Becerra, F., y Prieto, E. (2008). Evaluación antropométrica de estudiantes universitarios de Bogotá, Colombia. *Revista de salud Pública*, 10 (3), 433-442. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rsap/v10n3/v10n3a08.pdf>
- Ventocilla, G. J. (2015). *Clasificación de la fertilidad de los suelos del predio “Fundo Nuevo” por el método de capacidad-fertilidad. Végueta-Huaura*. (Tesis de grado). Facultad de Ingeniería Agraria. Universidad Católica Sedes Sapientiae, Huacho, Perú.
- Yakabi, K. S. (2014). *Estudio de las Propiedades Edáficas que Determinan la Fertilidad del Suelo en el Sistema de Andenería de la Comunidad Campesina San Pedro de Laraos, Provincia de Huarochirí*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5836>
- Yarasca, J. L. (2015). *Modelo sistémico para evaluar la recuperación de suelos contaminados por plomo en el distrito de Concepción*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro de Perú – Escuela de Posgrado, Huancayo, Perú. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/1481>

# TERMINOLOGÍA

## **Acumulación**

Proceso mediante el cual se aumenta la concentración de un producto químico en un organismo, respecto a la concentración ambiente (López y Contreras, 2017).

## **Aguas residuales**

Son las aguas cuyas características originales han sido alteradas por las diversas actividades humanas, produciéndose una merma en su calidad y que para ser reusadas requieren de un tratamiento previo, antes, vertidas a un cuerpo natural de agua limpia o descargadas al sistema de alcantarillado (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2008).

## **Analito**

Se denomina así al componente (elemento, compuesto o ion) de interés analítico de una muestra. La presencia o concentración de estos compuestos sirven para conocer la cantidad y concentración en un proceso de medición química, constituyendo un tipo particular de medida en la metrología química (Real Academia de Ingeniería, 1994).

## **Anfótero**

Los compuestos que pueden comportarse como ácidos o bases se denominan anfóteros. Aun cuando son opuestos, los conceptos de ácido y base no son excluyentes, de modo que una misma molécula puede comportarse como ambos. El  $\text{HCO}_3^-$  puede ceder un ion  $\text{H}^+$  para formar  $\text{CO}_3^{2-}$  o aceptar un ion  $\text{H}^+$  para formar  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (Pérez, 2014).

## **Antropometría**

Antropometría es la disciplina que describe las diferencias cuantitativas de las medidas del cuerpo humano y estudia las dimensiones considerando como referencia las estructuras anatómicas. Es decir, ayuda a describir las características físicas de una persona o grupo de personas y sirve de herramienta a la ergonomía con la finalidad de adaptar el entorno a las personas (Vargas *et al.*, 2008).

### **Biodisponibilidad**

Es el proceso por el cual un elemento químico pasa de una parte cualquiera del suelo a un ser vivo. Por otro lado, se considera que es la aptitud de transferencia de los metales pesados entre compartimentos, determinada por la forma, el número de cargas y la energía de retención de los metales (Avelino, 2013).

### **Contaminación**

Es la presencia o incorporación al ambiente de sustancias o elementos tóxicos que son perjudiciales para el hombre o los ecosistemas (seres vivos). Existen diferentes tipos de contaminación. Los más importantes son los que afectan a los recursos naturales (el aire, los suelos y el agua). Algunas de las alteraciones medioambientales más graves relacionadas con los fenómenos de contaminación son los escapes radiactivos, el smog, el efecto invernadero, la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono y la eutrofización de las aguas o las mareas negras (Durán, 2011).

### **Espectroscopia**

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica extremadamente sensible, y específica debido a que las líneas de absorción atómica son considerablemente estrechas (de 0,002 a 0,005 nm) y las energías de transición electrónica son únicas para cada elemento. La sensibilidad de la absorción atómica por atomización de llama está en el orden de los  $\text{mg.kg}^{-1}$ . Tiene una enorme aplicación para determinaciones cualitativas y cuantitativas de metales pesados que podrían desencadenar procesos negativos en los consumidores (Skoog *et al.*, 2001).

### **Ex situ**

Consiste en el mantenimiento de algunos componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales. Este tipo de conservación incluye tanto el almacenamiento de los recursos genéticos en bancos de germoplasma, como el establecimiento de colecciones de campo y el manejo de especies en cautiverio (Maguiña, 2017).

### **Materia orgánica**

La M.O. consiste en el producto de la descomposición química de restos animales y vegetales que conforman la necromasa y que son descompuestos mediante la actividad de los microorganismos (Avelino, 2013).

**Necromasa**

Parte de la biomasa de un ecosistema, formada por los cadáveres y órganos muertos. Aunque muchas veces se integra la necromasa dentro de la biomasa total de un ecosistema, en otras el término se aplica en oposición a biomasa, que en estos casos designa exclusivamente a la materia orgánica viva (Real Academia de Ingeniería, 1994).

**Suelo**

El suelo es un componente esencial del medio ambiente que está compuesto por minerales, materia orgánica, aire y agua. Dentro de sus principales funciones actúa como tampón, controlando el transporte de elementos químicos y sustancias hacia la atmósfera, hidrosfera y biosfera (Avelino, 2013).

**Toxicidad**

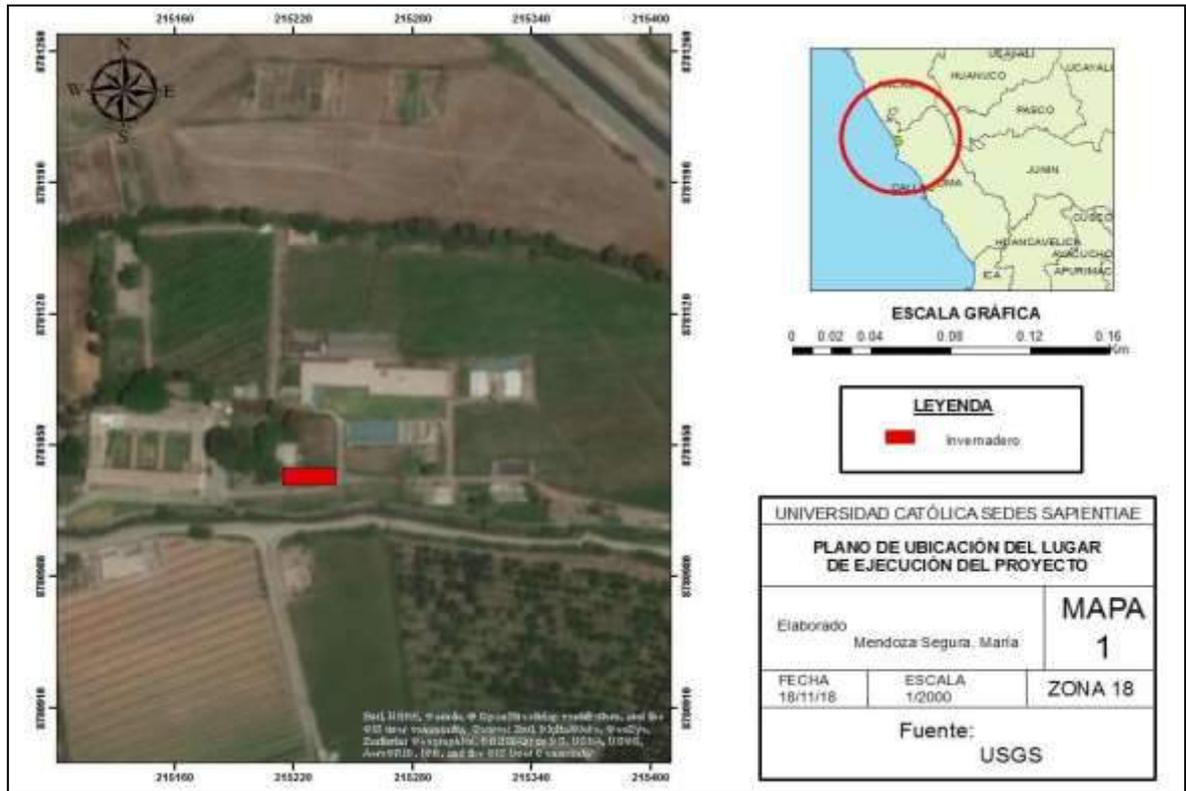
Es el grado de efectividad que poseen las sustancias que, por su composición, se consideran tóxicas. Se trata de una medida que se emplea para identificar al nivel tóxico de diversos fluidos o elementos, que pueden afectar un organismo en su totalidad (por ejemplo, el cuerpo del ser humano) e incluso sobre una subestructura (una célula) (Maguiña, 2017).

**Transferencia**

Es el proceso de transmisión o transporte de sustancias contaminantes de un medio a otro (López y Contreras, 2017).

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Plano de ubicación del lugar de ejecución del proyecto



Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 2. Tablas para la interpretación de los resultados del análisis de suelos

### a. Textura

| <b>Tipo de textura</b> | <b>Clase textural</b>   |
|------------------------|---|
| Gruesa                 | Arena, arena franca   |
| Moderadamente gruesa   | Franco arenosa  |
| Media                  | Franca, franco limoso, limosa   |
| Fina                   | Franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco arcillo limosa, arcillo arenosa, arcillo limosa, arcilla |
| Muy fina               | Mayor de 60% de arcilla   |

Fuente: Schoeneberger *et al.* (2012).

### b. pH

| <b>Definición</b>      | <b>Rango de pH</b> |
|------------------------|--------------------|
| Ultra ácido            | < 3,5              |
| Extremadamente ácido   | 3,5 a 4,4          |
| Muy fuertemente ácido  | 4,5 a 5,0          |
| Fuertemente ácido      | 5,1 a 5,5          |
| Moderadamente ácido    | 5,6 a 6,0          |
| Ligeramente ácido      | 6,1 – 6,5          |
| Neutro                 | 6,6 – 7,3          |
| Ligeramente básico     | 7,4 – 7,8          |
| Moderadamente básico   | 7,9 – 8,4          |
| Fuertemente básico     | 8,5 – 9,0          |
| Muy fuertemente básico | > 9,0              |

Fuente: Schoeneberger *et al.* (2012).

### c. Conductividad eléctrica (mmhos/cm o dS.m<sup>-1</sup>)

| <b>Definición</b>          | <b>Rango de salinidad</b> |
|----------------------------|---------------------------|
| Sin problemas de salinidad | < de 2                    |
| Ligeros problemas de sales | 2 – 4                     |
| Medio                      | 4 – 8                     |
| Severos problemas          | 8 – 16                    |
| Muy severos problemas      | > 16                      |

Fuente: Schoeneberger *et al.* (2012).

d. Materia orgánica

| <b>Definición</b> | <b>%</b> | <b>g.kg<sup>-1</sup></b> |
|-------------------|----------|--------------------------|
| Bajo              | < de 2   | < de 20                  |
| Medio             | 2 – 4    | 20 – 40                  |
| Alto              | > de 4   | > de 40                  |

*Fuente:* Schoeneberger *et al.* (2012).

Apéndice 3. Datos originales de la absorción del plomo por la “alfalfa”

a. Absorción de plomo por el follaje de la “alfalfa” (tallos y hojas) a los 45 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,5                          | 8,1       | 19,3       | 23,1       |
| II           | 0,5                          | 8,4       | 14,8       | 22,6       |
| III          | 0,7                          | 9,2       | 17,8       | 26,1       |

Fuente: Elaboración propia.

b. Absorción de plomo por las raíces de la “alfalfa” a los 45 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 1,7                          | 12,8      | 23,7       | 36,9       |
| II           | 1,1                          | 14,3      | 20,9       | 28,3       |
| III          | 1,5                          | 12,2      | 25,9       | 32,7       |

Fuente: Elaboración propia.

c. Remanente de plomo en el suelo a los 45 días

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 2,2                          | 42,3      | 90,2       | 145,3      |
| II           | 1,6                          | 47,5      | 80,2       | 136,8      |
| III          | 1,8                          | 45,4      | 81,0       | 140,5      |

Fuente: Elaboración propia.

d. Absorción de plomo por el follaje de la “alfalfa” (tallos y hojas) a los 90 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 1,8                          | 12,8      | 28,4       | 42,8       |
| II           | 1,9                          | 15,2      | 34,2       | 36,8       |
| III          | 2,3                          | 17,4      | 22,8       | 45,4       |

Fuente: Elaboración propia.

e. Absorción de plomo por las raíces de la “alfalfa” a los 90 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 1,9                          | 27,8      | 41,9       | 70,1       |
| II           | 2,8                          | 24,6      | 45,1       | 64,5       |
| III          | 2,3                          | 22,2      | 48,2       | 65,2       |

*Fuente:* Elaboración propia.

f. Remanente de plomo en el suelo a los 90 días

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 1,5                          | 38,4      | 58,6       | 93,4       |
| II           | 2,5                          | 30,3      | 65,4       | 85,5       |
| III          | 2,3                          | 33,2      | 64,2       | 87,3       |

*Fuente:* Elaboración propia.

Apéndice 4. Datos originales de la lectura en el fotómetro del contenido de plomo

a. Absorción de plomo por el follaje de la “alfalfa” (tallos y hojas) a los 45 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,05                         | 0,81      | 1,93       | 2,31       |
| II           | 0,05                         | 0,84      | 1,48       | 2,26       |
| III          | 0,07                         | 0,92      | 1,78       | 2,61       |

Fuente: Elaboración propia.

b. Absorción de plomo por las raíces de la “alfalfa” a los 45 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,17                         | 1,28      | 2,37       | 3,69       |
| II           | 0,11                         | 1,43      | 2,09       | 2,83       |
| III          | 0,15                         | 1,22      | 2,59       | 3,27       |

Fuente: Elaboración propia.

c. Remanente de plomo en el suelo a los 45 días

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,22                         | 4,23      | 9,02       | 14,53      |
| II           | 0,16                         | 4,75      | 8,02       | 13,68      |
| III          | 0,18                         | 4,54      | 8,10       | 14,05      |

Fuente: Elaboración propia.

d. Absorción de plomo por el follaje de la “alfalfa” (tallos y hojas) a los 90 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,18                         | 1,28      | 2,84       | 4,28       |
| II           | 0,19                         | 1,52      | 3,42       | 3,68       |
| III          | 0,23                         | 1,74      | 2,28       | 4,54       |

Fuente: Elaboración propia.

e. Absorción de plomo por las raíces de la “alfalfa” a los 90 días (mg.kg<sup>-1</sup>)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,19                         | 2,78      | 4,19       | 7,01       |
| II           | 0,28                         | 2,46      | 4,51       | 6,45       |
| III          | 0,23                         | 2,22      | 4,82       | 6,52       |

*Fuente:* Elaboración propia.

f. Remanente de plomo en el suelo a los 90 días

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |           |            |            |
|--------------|------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,15                         | 3,84      | 5,86       | 9,34       |
| II           | 0,25                         | 3,03      | 6,54       | 8,55       |
| III          | 0,23                         | 3,32      | 6,42       | 8,73       |

*Fuente:* Elaboración propia.

Apéndice 5. Datos de altura (45 y 90 días) y peso de la materia seca

a. Altura de plantas a los 45 días (cm)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |    |     |     |
|--------------|------------------------------|----|-----|-----|
|              | 0                            | 70 | 140 | 210 |
| I            | 49                           | 51 | 46  | 50  |
| II           | 52                           | 47 | 51  | 46  |
| III          | 50                           | 48 | 48  | 48  |

Fuente: Elaboración propia.

b. Altura de plantas a los 90 días (cm)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |    |     |     |
|--------------|------------------------------|----|-----|-----|
|              | 0                            | 70 | 140 | 210 |
| I            | 60                           | 66 | 55  | 65  |
| II           | 64                           | 60 | 62  | 61  |
| III          | 65                           | 62 | 56  | 59  |

Fuente: Elaboración propia.

c. Peso de la materia seca radicular de la “alfalfa” a los 90 días (g)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |      |      |      |
|--------------|------------------------------|------|------|------|
|              | 0                            | 70   | 140  | 210  |
| I            | 37,1                         | 37,9 | 35,7 | 33,4 |
| II           | 26,6                         | 27,0 | 36,8 | 30,3 |
| III          | 39,2                         | 38,3 | 33,2 | 36,4 |

Fuente: Elaboración propia.

d. Peso de la materia seca del follaje (hojas y tallos) de la “alfalfa” a los 90 días (g)

| Repeticiones | Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> ) |      |      |      |
|--------------|------------------------------|------|------|------|
|              | 0                            | 70   | 140  | 210  |
| I            | 65,9                         | 65,8 | 69,3 | 67,1 |
| II           | 52,7                         | 63,1 | 50,9 | 63,1 |
| III          | 56,7                         | 60,8 | 58,9 | 55,5 |

Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 6. Factores de bioconcentración de acuerdo con la extracción del plomo

### a. Factor de concentración en las raíces

| Repeticiones | Factor de bioconcentración en la raíz |           |            |            |
|--------------|---------------------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                              | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 1,3                                   | 0,7       | 0,7        | 0,8        |
| II           | 1,1                                   | 0,8       | 0,7        | 0,8        |
| III          | 1,0                                   | 0,7       | 0,8        | 0,7        |

*Fuente:* Elaboración propia.

### b. Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta de “alfalfa”

| Repeticiones | Factor de bioconcentración en la parte aérea |           |            |            |
|--------------|--|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                                     | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 1,2  | 0,3       | 0,5        | 0,5        |
| II           | 0,8  | 0,5       | 0,5        | 0,4        |
| III          | 1,0  | 0,5       | 0,4        | 0,5        |

*Fuente:* Elaboración propia.

### c. Factor de translocación

| Repeticiones | Factor de translocación |           |            |            |
|--------------|-------------------------|-----------|------------|------------|
|              | <b>0</b>                | <b>70</b> | <b>140</b> | <b>210</b> |
| I            | 0,9                     | 0,5       | 0,7        | 0,6        |
| II           | 0,7                     | 0,6       | 0,8        | 0,6        |
| III          | 1,0                     | 0,8       | 0,5        | 0,7        |

*Fuente:* Elaboración propia.

Apéndice 7. Resultados del análisis del agua de riego



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



### ANALISIS DE AGUA

SOLICITANTE : MARIA ENGRACIA MENDOZA SEGURA

PROCEDENCIA : LIMA/ HUAURA/ HUACHO/ MAZO

REFERENCIA : H.R. 67778

BOLETA : 2820

| No. Laboratorio    | 195           |       |
|--------------------|---------------|-------|
| No. Campo          | Agua de Riego |       |
| pH                 |               | 7.22  |
| C.E. dS/m          |               | 0.97  |
| Calcio meq/L       |               | 5.45  |
| Magnesio meq/L     |               | 1.33  |
| Potasio meq/L      |               | 0.23  |
| Sodio meq/L        |               | 3.54  |
| SUMA DE CATIONES   |               | 10.55 |
| Nitratos meq/L     |               | 0.07  |
| Carbonatos meq/L   |               | 0.00  |
| Bicarbonatos meq/L |               | 5.25  |
| Sulfatos meq/L     |               | 3.09  |
| Cloruros meq/L     |               | 2.00  |
| SUMA DE ANIONES    |               | 10.42 |
| Sodio %            |               | 33.56 |
| RAS                |               | 1.92  |
| Boro ppm           |               | 0.53  |
| Clasificación      |               | C3-S1 |
| Plomo ppm          |               | 0.055 |

La Molina, 09 de Abril del 2019



Dr. Sady García Bendezu  
 Jefe del Laboratorio

---

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Fuente: UNALM (2019).

Apéndice 8. Fotografías del proceso de investigación en el campo y en el laboratorio



Semilla de “alfalfa” utilizada en el experimento



Plantulas de “alfalfa” listas para el trasplante



Sustrato utilizado en el experimento



Toma de muestra del sustrato para su análisis



Dilución del nitrato de plomo de acuerdo a los tratamientos en estudio



Muestras de follaje fraccionado de la “alfalfa” para el análisis



Trasplante en macetas de la plántulas de “alfalfa”



Plántulas de “alfalfa” en desarrollo en la maceta



Medición de altura de la planta



Plantas de “alfalfa” en pleno crecimiento



Preparación de las plantas para su cosecha



Medición de la altura de plantas antes de la cosecha



Separación de las raíces cosechas con la ayuda de una zaranda



Oreado de las muestras de raíces para eliminar el exceso de agua



Material cosechado tanto de la parte aérea como de las raíces



Muestras colectadas secadas a la estufa a 105 °C durante 48 horas



Lectura del pH y la conductividad eléctrica



Calibración del fotómetro para la lectura del contenido de plomo



Digestión de las muestras con ácido nítrico



Lectura del plomo después de la digestión



Muestras para la determinación del  
carbono orgánico