

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Bioconcentración y transferencia de plomo en suelo - planta en el
cultivo de Ajo *Allium sativum* L. en zonas agrícolas del Centro
Poblado de Ruquia - Huaura, 2019

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

Lourdes Del Pilar Villanueva Gonzales

ASESOR

Roger Manuel Mestas Valero

Huara, Perú

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 01.- 2020/UCSS/FIADI

Siendo las 10:00 a.m. del día 10 de enero de 2020, en el Aula N° 5 de la Filial Huaura: Végueta - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|--|-----------------|
| 1. Dr. José Luis Rodríguez Núñez | Presidente |
| 2. Ing. Alejandro Ruiz Janje | Primer Miembro |
| 3. Mg. Elvira Teófila Castañeda Chirre | Segundo Miembro |
| 4. Dr. Roger Mestas Valero | Asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada: "BIOCONCENTRACIÓN Y TRANSFERENCIA DE PLOMO EN SUELO- PLANTA EN EL CULTIVO DE "AJO" *Allium sativum* L. EN ZONAS AGRÍCOLAS DEL CENTRO POBLADO DE RUQUIA-HUAURA, 2019", que presenta la bachiller en Ciencias Ambientales, la Sra. Lourdes del Pilar Villanueva Gonzales 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, el Jurado luego de deliberar acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

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

Firmado en Huaura, 10 de enero de 2020.


Dr. José Luis Rodríguez Núñez
PRESIDENTE


Ing. Alejandro Ruiz Janje
1° MIEMBRO


Mg. Elvira Teófila Castañeda Chirre
2° MIEMBRO


Dr. Roger Mestas Valero
ASESOR

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia por su apoyo incondicional para seguir adelante en este largo camino, en especial a mis Padres Alberto y Claudia, quienes me inculcaron valores que hoy en día reflejo en la práctica, siendo mi mejor carta de presentación, como persona, en mis recuerdos siempre tengo presente las palabras de mi madre: “Si te caes levántate, levanta la cabeza y camina siempre para adelante, no retrocedas en el camino siempre habrá obstáculos pero tú los vencerás porque eres valiente”, gracias por esos consejos que me ayudan a crecer y ser mejor persona cada día.

A mi esposo Ray Samuel Rodríguez Gómez, que siempre estuvo a mi lado ayudándome, dándome esa fortaleza que tanto necesité en los peores momentos, siempre estabas a mi lado junto a mí, pero en especial a Nicol y Sofía Rodríguez Villanueva, por enseñarme que no hay nada imposible que pueda hacer; el ser madre me llena de orgullo, me late el pecho con un amor único y sincero que solo un hijo lo sabe dar, solo queda dar gracias a Dios por todo lo que me brinda.

A mis queridos Hermanos Irma y Wilder, que siempre me apoyaron y me brindaron consejos, sé que no soy buena demostrándoles el gran amor que siento por ustedes, ya que para mí ustedes son un gran ejemplo en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que estuvieron apoyándome en mi etapa académica, gracias a mis queridos profesores: Roger Mestas, Armando Chiclla, Heidi Sánchez, Elvira Castañeda, Gloria Rivera, José Luis Rodríguez, Eloy Munive, Fredy Paredes y Walter Yasuda, ya que formamos una buena amistad porque aprendí a conocerlos más a fondo, siempre agradecer los consejos que nos brindaron en las aulas de mi querida Universidad (UCSS).

A mis amigas (os) que siempre los recordaré con mucho cariño como son: María Acero, Lidia Trejo, Graciela Palacios, Karen Calderón, Karen Moscoso, Deysi Ramírez, Keyla Sánchez, Brenda Coa, Estela Villanueva, Javier Solís, Amadeo Meza, Jersson Oyolo y un agradecimiento muy especial a Anthony Vásquez, una gran persona que hoy en día DIOS le puso una gran prueba en la vida, sé que en la vida no todo es fácil o sencillo, pero la Fé es lo que jamás debemos de perder y eso lo aprendí de ti, mi amigo.

Solo me queda dar gracias a DIOS por darme la fortaleza de seguir adelante a pesar de tantos obstáculos presentados en mi vida, doy gracias de poder darme una familia, amigos, maestros que me acompañaron y me enseñaron a ser fuerte, pero sobre todo hacer mejor cada día, seguir creyendo en mí misma porque la vida es corta y hay que saber valorar lo que se tiene.

Muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

Índice general	v
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Índice de apéndices.....	x
Resumen	xi
Abstract.....	xii
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Bases teóricas especializadas	8
1.2.1. Los metales pesados en el suelo, sus efectos en el suelo y tolerancia en las plantas.....	8
1.2.2. Tolerancia de las plantas hacia los metales pesados	13
1.2.3. Contaminación por plomo en el suelo.....	13
1.2.4 El ajo (<i>Allium sativum</i>).....	14
1.2.4 Mecanismos asociados a la extracción de metales pesados por plantas.....	15
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 Diseño de la investigación.....	20
2.1.1 Lugar y fecha.....	20
2.1.2 Población y muestra	20
2.2 Descripción de la investigación.....	22
2.2.1 Fase preliminar	22
2.2.2 Fase de campo	23
2.2.3 Fase de laboratorio	23
2.3 Identificación de variables y su mensuración.....	25
2.3.1 Transferencia de plomo en suelos y planta	25
2.3.2 Bioconcentración de plomo en la planta	25
2.4 Análisis estadístico de datos.....	26
CAPÍTULO III: RESULTADOS	27
3.1 Caracterización fisicoquímico de las muestras de suelo	27
3.1.1 Determinación del pH de los suelos	27

3.1.2	Obtención de los valores promedios del porcentaje de materia orgánica del suelo	28
3.1.3	Obtención de los valores de conductividad eléctrica de los suelos	29
3.2	Concentración de plomo en los suelos	30
3.3	Concentración de plomo en las diferentes partes de la planta de “Ajo”	31
3.3.1	Concentración de plomo en la raíz del “Ajo”	31
3.3.2	Concentración de plomo en el bulbo.....	32
3.4.	Obtención de factor de bioconcentración.....	33
3.5.	Obtención de factor de transferencia.....	34
3.6.	Análisis de la correlación de Pearson de las variables cuantitativas	35
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES		37
4.1.	Caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo	37
4.2.	Concentración de plomo en los suelos	38
4.3.	Factor de bioconcentración y transferencia del plomo.....	39
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		42
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES		43
Referencias		44
Terminología		50
Apéndices		52

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo establecidos en la localidad de Ruquia – Huaura</i>	22
Tabla 2. <i>Variable en estudio, unidades de medida y método de análisis</i>	26
Tabla 3 <i>Valores promedio de pH obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo</i>	27
Tabla 4 <i>Valores promedio del % de materia orgánica obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo</i>	28
Tabla 5 <i>Valores promedio de la conductividad eléctrica ($mS.cm^{-1}$) obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo</i>	29
Tabla 6. <i>Valores promedio de la concentración de plomo ($mg.kg^{-1}$) obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo</i>	30
Tabla 7. <i>Valores promedio de la concentración de plomo ($mg.kg^{-1}$) obtenidos de las muestras de raíces de plantas extraídas de suelos en los distintos puntos de muestreo en la localidad de Ruquia</i>	31
Tabla 8. <i>Valores promedio de la concentración de plomo ($mg.kg^{-1}$) obtenidos de las muestras de bulbo del ajo extraídas de suelos en los distintos puntos de muestreo en la localidad de Ruquia</i>	32
Tabla 9. <i>Valores promedio del Factor de Bioconcentración (FBC) obtenido entre la concentración del metal presente en la raíz y la concentración del metal presente en el suelo</i>	33
Tabla 10. <i>Valores promedio del Factor de Transferencia (FT) obtenido entre la concentración del metal presente en el bulbo y la concentración del metal presente en la raíz</i>	34
Tabla 11. <i>Análisis de correlación de Pearson de las variables cuantitativas (FBC= Factor de Bioconcentración)</i>	36
Tabla 12. <i>Prueba de Tukey de la variación de plomo</i>	55
Tabla 13. <i>Formato para la recolección de muestra</i>	63

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Interacción de metales pesados en el suelo.	11
<i>Figura 2.</i> Rutas de entrada de los metales en las plantas.	12
<i>Figura 3.</i> Aspectos morfológicos del ajo.	15
<i>Figura 4.</i> Puntos de muestreo en la localidad de Ruquia – Huaura.	21
<i>Figura 5.</i> pH vs concentración de plomo en raíz (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación=0.665)	56
<i>Figura 6.</i> pH vs materia orgánica (%). (Cociente de correlación= 0.560).	56
<i>Figura 7.</i> pH vs plomo en bulbo (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación= -0.719)..	57
<i>Figura 8.</i> pH vs Factor de bioconcentración. (Cociente de correlación= -0.453).	57
<i>Figura 9.</i> pH vs Factor de transferencia. (Cociente de correlación=- 0.600).	58
<i>Figura 10.</i> Plomo en bulbo(mg.kg^{-1}) vs Conductividad (mS.cm^{-1}). (Cociente de correlación=0.444)	58
<i>Figura 11.</i> Factor de transferencia vs Conductividad (mS.cm^{-1}). (Cociente de correlación=0.296).	59
<i>Figura 12.</i> Materia orgánica (%) vs plomo en raíz (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación=-0.297).	59
<i>Figura 13.</i> Materia orgánica (%) vs plomo en bulbo (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación=-0.402).	60
<i>Figura 14.</i> Materia orgánica (%) vs factor de transferencia. (Cociente de correlación=-0.409).	60
<i>Figura 15.</i> Factor de bioconcentración vs concentración de plomo en bulbo(mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación=0.447).	61
<i>Figura 16.</i> Factor de transferencia vs concentración de plomo en bulbo(mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación=0.828).	61
<i>Figura 17.</i> Concentración de plomo en raíz (mg.kg^{-1}) vs concentración de plomo en bulbo (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación=0.697).	62
<i>Figura 18.</i> Recolección de las plantas de ajo de la localidad de Ruquia.	64
<i>Figura 19.</i> Recolección de las plantas de ajo de la localidad de Ruquia.	65
<i>Figura 20.</i> Recolección de la muestra de suelo en la localidad de Ruquia - Huaura.	66
<i>Figura 21.</i> Realización de las calicatas para la toma de muestra de suelo en la localidad de Ruquia – Huaura.	67

<i>Figura 22.</i> Procesamiento de las muestras vegetales en laboratorio.....	68
<i>Figura 23.</i> Digestión de las muestras para posterior análisis.....	69
<i>Figura 24.</i> Preparación y lectura de las muestras con el fotómetro.....	70

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Guía para muestreo de suelos.....	526
Apéndice 2. Guía para la calidad de suelos según la Norma Canadá para los parámetros conductividad y pH.....	67
Apéndice 3. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Suelo.....	68
Apéndice 4. Prueba de Tukey de la variación de plomo	69
Apéndice 5. Diagrama de dispersión de las variables	70
Apéndice 6. Formato para recolectar muestras	77
Apéndice 7. Registro fotográfico de la investigación.....	78

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la transferencia de plomo en suelo - planta “ajo” (*Allium sativum* L.) en zonas agrícolas del centro poblado Ruquia-Huaura. La investigación consistió en recolectar 5.0 kg de muestras de suelo de calicatas de 30.0 cm y plantas de ajo de 15 puntos de muestreo ubicados en la localidad de Ruquia. Las muestras para su análisis fueron trasladadas al laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae - Sede Lima. A las muestras de suelo se les determinó los parámetros fisicoquímicos como son la materia orgánica, conductividad eléctrica, pH y la concentración de plomo, mientras que las plantas de ajo fueron lavadas cuidadosamente y secadas a estufa a 60 °C por 4 días, separando la raíz de los bulbos para su análisis independiente. Se determinó la concentración de plomo en raíces y bulbos de la planta de ajo por fotometría y se obtuvieron los valores de Factor de Bioconcentración (FBC) y Factor de Transferencia (FT) del plomo en la planta. Los resultados de la concentración de plomo en los diferentes puntos de muestreo de suelo mínimos y máximos fueron 5.1 ± 1.5 y 9.8 ± 2.02 mg.kg⁻¹ respectivamente. El ajo presentó como factor de bioconcentración (FBC) el valor máximo de 0.37 que lo ubica como una especie indicadora para el metal plomo. Por otro lado, los resultados del Factor de Transferencia (FT) fueron entre 0.14 y 0.37, esto permitió clasificar a esta planta como alto potencial fitoestabilizador y que por el contenido de plomo presente en las raíces sugiere que esta planta incluye este metal a la rizosfera y podría ser un cultivo que represente un alto riesgo de contaminación, por acumular plomo y ser usado para consumo humano.

Palabras clave: Ajo, *Allium sativum*, localidad de Ruquia, factor de bioconcentración, factor de transferencia, plomo.

ABSTRACT

The present investigation aimed to determine the lead transfer in the soil "garlic" plant (*Allium sativum* L.) in agricultural areas of the center of the Ruquia-Huaura village. The research consisted of collecting 5.0 kg of soil samples from 30.0 cm calicatas and "garlic" plants from 15 sampling points located in the city of Ruquia. Samples for analysis were transferred to the Laboratorio de Microbiología y Biotecnología of the Catholic University Sedes Sapientiae – Campus Lima. To the soil samples the physicochemical parameters were determined such as organic matter, electrical conductivity, pH and the concentration of lead, while the "garlic" plants were carefully washed and dried in an oven at 60 °C for 4 days, separating the bulb root for independent analysis. The concentration of lead in roots and bulbs of the "garlic" plant was determined by photometry and the Bioconcentration Factor (BCF) and Transfer Factor (TF) values of the lead in the plant were obtained. The results of the lead concentration at the different minimum and maximum soil sampling points were 5.1 ± 1.5 and 9.8 ± 2.02 mg.kg⁻¹ respectively. "garlic" presented as a bioconcentration factor (BCF) the maximum value of 0.37 which places it as an indicator species for metallic lead. On the other hand, the results of the Transfer Factor (TF) were between 0.14 and 0.37, which allowed to classify this plant as a high potential for phytostabilizer and that, due to the content of lead present in the roots, suggests that this plant includes this metal for the rhizosphere and could be a crop that represents a high risk of contamination, by accumulating lead and being used for human consumption.

Key words: Garlic, *Allium sativum*, Ruquia locality, bioconcentration factor, transfer factor, lead.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la minería y la agricultura han sido reconocidas como las principales fuentes de contaminación para el medio ambiente y en especial para los suelos (Navarro *et al.*, 2007). El uso de agroquímicos dentro de la actividad agrícola ha generado posibles efectos al ecosistema como son: el agotamiento de los nutrientes, intoxicaciones y contaminación (Ortiz *et al.*, 2009).

Uno de los principales contaminantes es el plomo, metal pesado de gran distribución y acumulación en suelos. La presencia de este metal en los ecosistemas es mayor al de otros elementos y los principales efectos fitotóxicos que puede provocar este metal en la planta son la alteración de la relación agua - planta. Esto puede causar una gran cantidad de problemas como son las afecciones a la hoja, un incremento de la permeabilidad celular, como también la inhibición de la fotosíntesis y por ende la respiración celular de la planta (Bhargava *et al.*, 2012). Además, genera gran preocupación para la salud humana dado que el ingreso de plomo al cuerpo puede darse a través de diversas formas, como la ingesta a través de alimentos contaminados y la inhalación de aire con gran cantidad de macropartículas que se irán acumulando en nuestro organismo (cerebro, hígado y riñones), por ello se suele medir la concentración de plomo mediante unos exámenes de sangre (Järup, 2003).

Actualmente en la región Lima la agricultura presenta una inadecuada gestión en el uso de agroquímicos, en donde el uso de estos insumos que contienen metales pesados resulta ser una amenaza al medio ambiente. Además, se desconoce las diferentes formas químicas en los que se presentan una gran cantidad de estas sustancias que llevan dichos contaminantes y que se liberan al tener contacto con el agua y el suelo; así como los diversos mecanismos de transformación que se dan para su reducción final.

Las plantas son buenos indicadores de la contaminación y la disponibilidad de metales pesados en el suelo. Dentro de este grupo de organismos, las Amaryllidaceae han sido

consideradas como excelentes modelos de plantas hiperacumuladoras de metales pesados, además los estudios de la absorción de estos contaminantes permiten establecer las rutas de exposición de los metales en el suelo. Las investigaciones ligadas a determinar la concentración de metales pesados, entre ellos el plomo, sirven para poder conocer su movilidad y sus efectos tóxicos (González *et al.*, 2011).

La ruta de los contaminantes metálicos como el plomo en la planta de ajo no ha sido estudiada, y dada a la abundancia de depósitos minerales en toda la región de Lima, esta planta surge como una posible alternativa de estudio en relación a su tolerancia frente a metales pesados y a su papel como agente reservorio - intermediario de metales pesados a través de la ingesta de alimentos en seres humanos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el factor de Bioconcentración y Transferencia de plomo en suelo - planta en el cultivo de “ajo” (*Allium sativum* L.) en zonas agrícolas del centro poblado Ruquia - Huaura.

Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización Físico química de los suelos agrícolas del centro poblado Ruquia-Huaura.
- Cuantificar el nivel de plomo presente en el suelo agrícola del centro poblado Ruquia Huaura.
- Determinar el nivel de plomo presente en las diferentes partes de las plantas de “ajo” (*Allium sativum* L.).
- Determinar el factor de Bioconcentración y estimar la transferencia del plomo del suelo hacia la planta de ajo

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

En el ámbito internacional, Pérez *et al.* (2008) realizaron un estudio sobre la transferencia de metales como el plomo, hacia los órganos de plantas de cultivo de brócoli. La investigación tuvo por objetivo cuantificar las concentraciones de Zn, Pb, Cd y Ni en el suelo y los tallos del brócoli; así como determinar las tasas de transferencias de dichos metales desde el suelo hasta los tallos. La investigación fue realizada en la localidad de Chapingo-México. Los metales fueron cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica (Pb, Cd, Ni y Zn) tanto para suelos como para los tallos de brócoli. Estas muestras fueron tomadas de 28 parcelas irrigadas con aguas provenientes de diversas fuentes. Asimismo, fueron realizadas las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos y la tasa de transferencia suelo-tallo. Los resultados evidenciaron que los suelos registraban concentraciones de Zn, Pb, Ni y Cd que oscilaron de 1.90 a 11.02; de 3.74 a 6.42; de 0.65 a 1.36 y de 0.08 a 0.27 mg.kg⁻¹ respectivamente. Los tallitos presentaron concentraciones elevadas con respecto a las evaluaciones iniciales. Los autores indicaron que lo registrado en los tallos fue superior a lo obtenido en los suelos, por lo que fue supuesto que el suelo no era la única fuente de metales para las plantas analizadas. La investigación mostró que hubo un alto grado de correlación entre las características químicas de los suelos (MO, N y CIC) y la concentración de metales pesados en el suelo.

Prieto *et al.* (2009) realizaron una revisión sobre la contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados presentes en suelos y aguas. Esta compilación realizada en el Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en México permitió determinar que los metales pesados están contenidos en gran escala en suelos y aguas residuales negras, las cuales son generalmente utilizadas en sistemas de riego agrícola, contaminando fuentes importantes para la agricultura. Los autores señalaron la potencialidad del uso de especies vegetales como la “cebolla” (*Allium cepa* L.), “betarraga” (*Beta vulgaris*

L.), “arroz” (*Oriza sativa* L.) y “rabanito” (*Raphanus sativus* L.). Especies que pueden ser usados en bioensayos y en estudios de toxicidad para evaluar a las sustancias químicas peligrosas liberadas al ambiente. Los autores remarcaron que existe aún un desconocimiento de los efectos de los metales pesados en plantas, principalmente las vasculares y fue puesto en manifiesto la actividad del metal plomo sobre el crecimiento. Por lo expuesto, fue destacada la actividad de los metales pesados como el Pb, cuya actividad precisa en disminuir el crecimiento de las raíces y la frecuencia de células somáticas y el aumento de células aberrantes en la cebolla, además de la respuesta rápida de algunas plantas a la exposición de los metales pesados y la facilidad en bioacumularlos.

Alcoba (2014) evaluó la transferencia suelo-planta de elementos traza como el Zn, Fe, Mn, Pb, Cu y el metaloide As, presentes en zonas contaminadas por residuos mineros de elevada salinidad, en la Bahía de Portmán, Murcia, España. En esta investigación fueron colectadas muestras representativas de suelo y plantas. El autor realizó las determinaciones fisicoquímicas generales como son pH, CE y granulometría; además fue usado el espectrofotómetro de absorción atómica para la determinación del contenido de elementos traza como son el: Zn, Fe, Mn, Pb, Cd y Cu presentes en suelo, raíces y en los órganos aéreos de la planta y para el metaloide As fue determinada la concentración mediante la espectrometría de fluorescencia atómica con generación de Hidruros. Los resultados mostraron que la composición cualitativa de los diferentes suelos fue similar y que la interpretación del factor de transferencia entre parte aérea y raíz indicó un desplazamiento positivo de estos elementos traza, a la vez quedó demostrado que las concentraciones de los elementos traza dependería del tipo de planta y el elemento traza analizado.

Pila (2016) elaboró una investigación sobre la determinación de la presencia de plomo y cadmio en dos hortalizas “lechuga” (*Lactuca sativa* L.) y “zanahoria” (*Daucus carota* L.) en el Quinche, Quito, Ecuador. El objetivo fue evaluar los valores de los metales pesados cadmio y plomo presentes en la lechuga y zanahoria, además de comparar 2 sistemas de producción. El autor planteó un diseño metodológico experimental, en donde fue utilizado un equipo de absorción atómica para evaluar la presencia de los metales pesados en suelo, agua y los cultivos. La concentración de plomo encontrado no supero la norma peruana y presento los valores de 0.21 y 0.28 mg.kg⁻¹ para cada uno de los sistemas respectivamente.

Por otro lado, la concentración de cadmio encontrado en ambos tipos de sistema superó los límites establecidos y normados por el Codex para los contaminantes presentes en cualquier tipo de alimento. Los resultados del análisis de plomo en zanahoria presentaron valores de 0.12 y 0.19 mg.kg⁻¹ para los dos sistemas. Estos valores superan el límite establecido. En ese sentido, el autor concluyó que existieron diferencias en los valores de acumulación de plomo y cadmio en las plantas analizadas, además fue encontrada una mayor concentración de plomo en cultivos con sistemas orgánicos. Por otro lado, el cadmio fue encontrado en cultivos con aplicación de fertilizantes. Asimismo, concluyeron que la posible causa de contaminación de los metales pesados plomo y cadmio fue la exposición al agua de riego y suelo.

A nivel nacional, Durán (2010) realizó una investigación sobre la transferencia de metales de suelo a la planta. La investigación fue realizada tanto en Perú como en España. El objetivo fue comparar las floras de las localidades de Hualgayoc (Cajamarca – Perú) y las de Poblet (Tarragona - España) frente al impacto de los metales pesados presentes en suelo. Para realizar la investigación extrajeron de la zona de Hualgayoc 167 plantas, pertenecientes a 25 especies y que corresponden a 8 familias botánicas. Mientras de la zona de Poblet, fue recolectado un total de 169 plantas, pertenecientes a 13 especies y a 12 familias, siendo la familia Liliaceae el grupo más abundante. Fue realizado el análisis químico de cada una de las partes de las plantas para determinar la concentración metálica, así como también analizó fisicoquímicamente al suelo. Los resultados de los análisis revelaron altas concentraciones fitotóxicas en el suelo y en las plantas, por lo que el autor concluyó que los suelos de las localidades que tuvieron altas concentraciones de contaminantes metálicos presentaron plantas que toleraron y acumularon estos contaminantes en sus tejidos. Las principales plantas identificadas con esta actividad correspondieron a 6 especies siendo *Bidens triplinervia* Kunth y *Senecio* sp, las más representativas para acumular metales pesados en la parte aérea.

Chávez (2014) realizó una investigación sobre la contaminación de plomo en los suelos y adaptación de las plantas a esas condiciones. El objetivo fue determinar la capacidad remediadora de la flora en estos suelos contaminados con plomo. En este estudio, el autor recolectó 37 plantas de 12 lugares localizados en la ciudad de La Oroya y el lago Junín

(Cerro de Pasco y Junín - Perú) con altos pasivos mineros. Fueron seleccionadas 2 especies pertenecientes a los géneros *Calamagrostis* y *Nicotiana* para su cultivo bajo 3 concentraciones de plomo a 700, 1 000 y 1 200 ppm. Asimismo, fue cultivada la planta de vetiver (*Vetiveria zizanoides* L. Nash) a fin de comparar su potencial fitorremediador con el de las especies nativas. Los experimentos duraron 60 días y fueron realizados en los ambientes de la Universidad Agraria La Molina (UNALM)-Lima. El autor concluyó que la *Nicotiana tabacum* tenía el mayor potencial de fitorremediación por presentar una mayor biomasa aérea, una alta actividad extractora del metal (0.3 mg de Pb), una gran facilidad de trasladar iones metálicos de las raíces a los órganos aéreos, un alto almacenamiento de plomo en raíces y una adaptación a factores climáticos, superior a las otras especies evaluadas.

León (2017) realizó una investigación con especies vegetales alto andinas que tuvo por objetivo evaluar el potencial fitorremediador para los suelos contaminados con metales pesados en condiciones de invernadero. El experimento fue realizado en entre las provincias de Aija y Recuay en el departamento de Áncash, Perú, en dos etapas. La primera estuvo enfocada principalmente en aspectos de su propagación vegetal, y la segunda en determinar la mayor capacidad de propagación expuesta a suelos con metales pesados y suelos de minas. El autor analizó fisicoquímicamente las muestras y desarrolló cálculos como el factor de translocación y el factor de bioconcentración. Los resultados indicaron que *Juncus articus* (Willd) y *Achyrocline alata* (Kunth) DC. Fueron las que presentaron mayor crecimiento, mientras que las especies *Werneria nubigena* (Kunth) y *Hieracium* sp presentaron un crecimiento constante. La especie *Achyrocline alata* presentó una mayor concentración del metal pesado Pb y Zn en la raíz y suelo de mina respectivamente, también fue constatada una concentración significativa de Zn en la parte aérea para el grupo suelo con metales pesados. La especie *Werneria nubigena* presentó la mayor concentración de Zn en la parte aérea para los grupos de suelo con metales pesados y suelo de mina. El investigador concluyó que las especies vegetales *Achyrocline alata*, *Werneria nubigena* y *Juncus articus* a condiciones de invernadero, mostraron un alto potencial fitobiorremediador debido a su alta tasa de propagación y a su alta capacidad acumuladora de metales pesados.

De la Cruz (2018) realizó un estudio referente a la acumulación de plomo en el cultivo de “huacatay” (*Tagetes minuta*) debido al mal manejo de agroquímicos en Carapongo, Lima,

Perú. Esta investigación buscó evaluar la influencia de la concentración del metal pesado plomo presente en los fertilizantes y en las muestras de huacatay. Las muestras consideradas estuvieron conformadas por cinco parcelas, con una dimensión de 400 m² para cada parcela, de las cuales fueron extraídas muestras del cultivo de “huacatay” (*Tagetes minuta*), así como muestras del suelo. El periodo de evaluación fue de dos meses, durante el cual fue verificada la alta presencia de plomo en el suelo, agua de riego y en diversos órganos de la planta del cultivo de huacatay. Este estudio presentó un diseño cuasi-experimental, cuyos resultados mostraron una alta concentración del metal pesado plomo tanto en suelo como en el agua de riego. Los valores presentados superaron los estándares de calidad ambiental para agua y suelo. Los resultados del análisis realizado al huacatay presentaron altos valores de plomo, en donde el cultivo al cual fue aplicado ciertos fertilizantes presentó concentraciones de plomo que oscilaron entre 10.24 a 12.48 mg.kg⁻¹ y en el cultivo orgánico fueron encontrados valores muchos más altos entre 13.23 a 15.18 mg.kg⁻¹ de plomo. Al respecto, el autor concluyó que la presencia de plomo fue mayor en el cultivo orgánico que en el convencional.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Los metales pesados en el suelo, sus efectos en el suelo y tolerancia en las plantas

Los metales pesados en el suelo

El origen del suelo está explicado en la interacción de los sistemas tanto gaseosos que componen la atmósfera, hidrósfera y biósfera sobre la superficie de la geósfera. También, la meteorización química y mecánica de las rocas que están asociados a los procesos microbiológicos que genera el suelo. La energía solar es uno de los componentes que controla el proceso de meteorización química y regula el ciclo del agua, manteniendo una estabilidad bajo condiciones no alteradas. El hombre es el principal responsable de romper ese equilibrio, principalmente generado por actividades productivas como la agricultura, minería y algunas actividades industriales. Estos impactos negativos al suelo son conocidos como degradación. La contaminación está referida a un tipo de degradación influenciada por la presencia de algunos minerales y compuestos contaminantes. El contaminante se presenta casi siempre en concentraciones altas generando efectos adversos sobre muchos organismos y por su origen pueden ser geogénico (natural) o antropogénico (provocado). Los contaminantes de origen geogénico proceden de la roca madre, mientras que los de origen

antropogénico son generados por residuos peligrosos como resultado de actividades industriales, mineras, agrícolas y residuos sólidos. La gran mayoría de los compuestos tóxicos no son generados biológicamente, salvo las toxinas que son elaborados por organismos vivos y son de carácter biogénico (Galán y Romero, 2008).

Los contaminantes presentan varias vías de exposición, pueden distribuirse en los suelos por diferentes mecanismos, tales como la volatilización y lixiviación y difundirse hasta llegar al hombre que puede asimilarlo gracias a la solubilidad del contaminante. El proceso por el cual el contaminante quede libre o sea absorbido por un organismo vivo se denomina disponibilidad. La biodisponibilidad es la forma en la que se halla una sustancia o un ion químico en un lugar determinado para ser captado o ingerido por un organismo vivo. Generalmente una pequeña porción de una sustancia contaminante, depositada en un lugar determinado, suele ser biodisponible y sus efectos pueden ser variables, en algunos casos muy nocivos y en otros indiferente al organismo expuesto (Galán y Romero, 2008).

Metal pesado

Rodríguez *et al.* (2006), refieren que los metales pesados son los elementos químicos que tienen un peso atómico comprendido entre 63.5, correspondiente para el metal cobre, y 200.59 para mercurio, además de tener un peso específico por encima de 4 g.cm^{-3} . Con estas características tenemos los elementos químicos: plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), zinc (Zn), cobre (Cu), plata (Ag) y el metaloide Arsénico (As), estos elementos pueden ser tóxicos para una gran cantidad de organismos y mortales en altas concentraciones.

Efecto de metal pesado en el suelo

La contaminación generada por el hombre a las aguas y atmosfera origina la incorporación de residuos al suelo y su posterior transmisión a otras cadenas tróficas como la iniciada por las plantas. Estos organismos productores permiten la fijación y distribución de elementos metálicos principalmente. La presencia de metales pesados en el suelo suele alcanzar niveles por encima de lo máximos permitidos y causar daños que se reflejan en el desarrollo normal en las plantas y generar un desequilibrio de las funciones afectando a otros componentes del

ecosistema, como a las poblaciones de microorganismos presentes en el suelo. A esta contaminación también se la denomina como polución del suelo (Volke *et al.*, 2005).

Inicialmente los iones metálicos generan el bloqueo de muchas estructuras y afecta las reacciones químicas dentro de los organismos. Reacciones biológicas, como la inactivación de enzimas y proteínas, generando una gran cantidad de daño irreparable en los organismos afectados. El parámetro pH es uno de los más importantes a considerar en los análisis de suelos, el estudio de disponibilidad de metales nos refiere que la mayoría de ellos están más disponibles en medios ácidos que en medios alcalinos. Algunas investigaciones concluyen que la adsorción de metales pesados está fuertemente relacionada por el pH del suelo. La característica y composición de los suelos ayudan en la entrada de metales pesados, se ha observado que suelos arcillosos permiten la retención de metales, mientras que los suelos arenosos, por el contrario, permiten una poca o escasa captación de metales pesados (Volke *et al.*, 2005).

Movilización de los metales en el suelo

Los metales pesados presentan una repartición y redistribución lenta en el suelo con los otros componentes de la fase sólida. Inicialmente se da inicio a una rápida retención del metal y seguida de reacciones lentas, todas ellas dependientes del contaminante, tipo de suelo, nivel de ingreso del contaminante y el tiempo (Han, 2003, citado por Flores, 2018, p. 15). La Figura 1 representa las formas de distribución de los metales en el suelo.

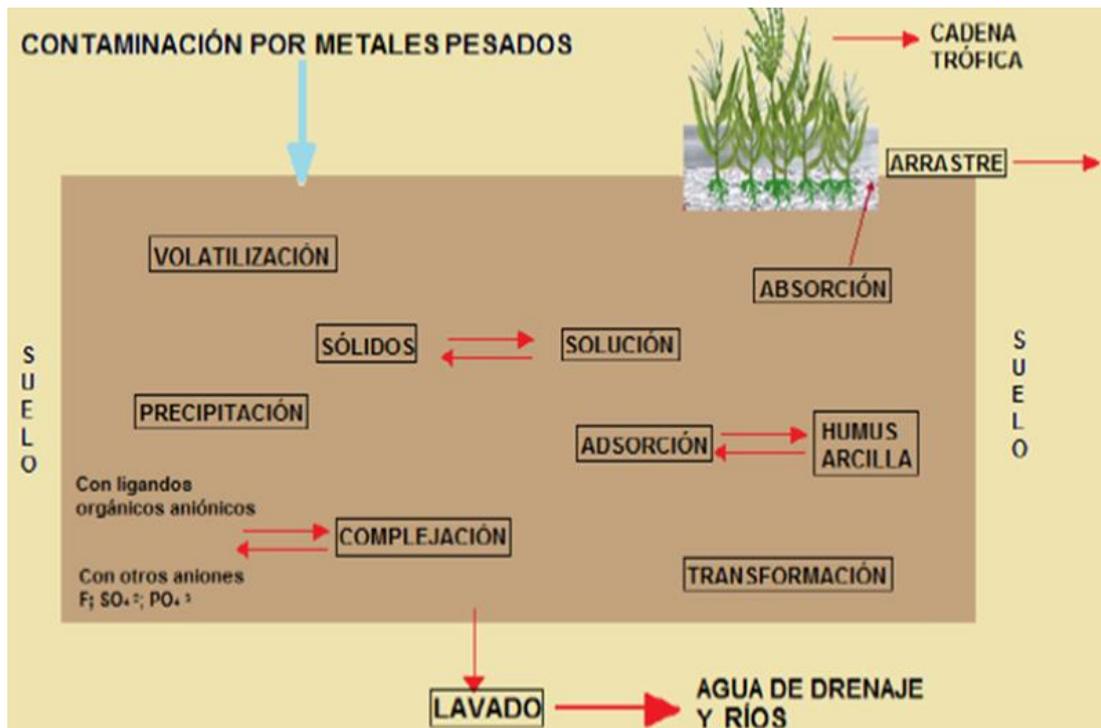


Figura 1. Interacción de metales pesados en el suelo. Fuente: Flores (2018).

Transporte de metales pesados de la raíz a las hojas

Las plantas realizan procesos que permiten llevar los nutrientes y agua desde las raíces a las hojas, estos órganos presentan a su vez, una gran red de vasos conductores que comprende el tejido vascular de la planta, constituido por paquetes de célula íntimamente conectados, estos son la xilema y el floema. Estas células están formadas por redes de células huecas, traqueidas y tubos cribosos, que unidas transportan la savia (incluyendo los metales pesados) por toda la planta, tanto desde la zona radicular hasta las hojas, así como desde éstas a otras partes de la planta (Flores, 2018).

Como se observa en la Figura 2, el agua y los iones metálicos que son ingresados por la raíz, son transportados en principio por el vaso conductor llamado xilema a las diferentes partes de las hojas. Este transporte, permite el desplazamiento libre del disolvente y de los metales pesados a través de esos vasos cribosos, pero únicamente en forma de quelatos que hayan sido formados. La transportación del metal de la raíz a las hojas se da mediante transportadores que los llevan desde el simplasto de las raíces hasta los espacios intercelulares (apoplasto) de la xilema, conducidos por finos capilares que se ayudan por una

diferencia de presión causada por la transpiración del agua en las hojas de las plantas (Flores, 2018).

Los mecanismos ligados al ingreso de los metales a nivel celular ya están ligados a las proteínas de membrana, que permiten el ingreso del metal a través de canales, inclusive no teniendo afinidad de la membrana por los metales, se sabe que por dentro de la membrana citoplasmática el potencial de la membrana es negativa, lo que facilita la entrada de cationes mediante transportadores secundarios (Flores, 2018).

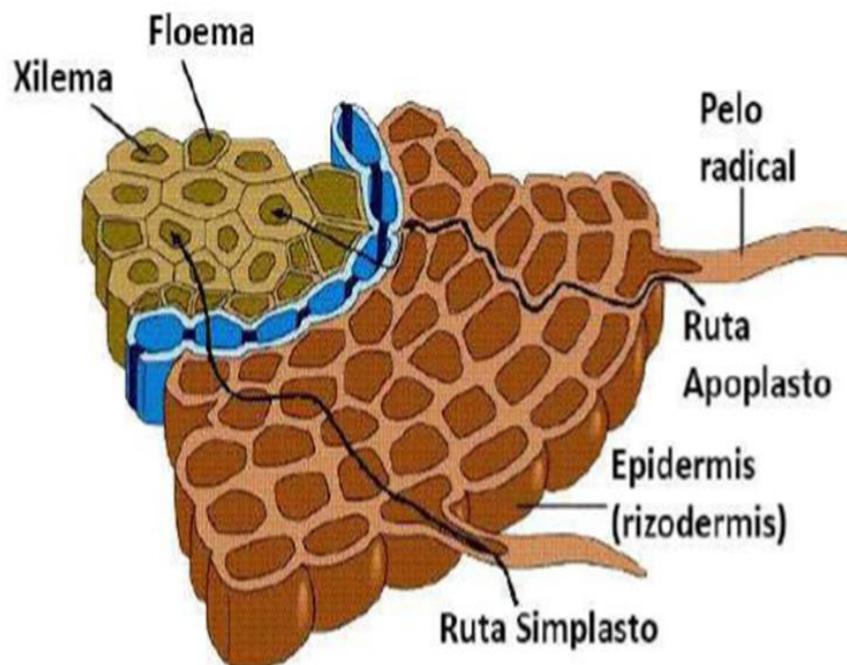


Figura 2. Rutas de entrada de los metales en las plantas. *Fuente:* Flores (2018).

En general, los metales pesados depositados en el suelo pueden seguir mecanismos diversos de distribución (García y Dorronsoro, 2005). Pueden ser retenidos en el suelo en diferentes formas (algunos disueltos en su fase líquida)

- Pueden unirse con la materia orgánica del suelo.
- Pueden ser captados por las plantas y distribuirse a todos sus órganos y así a toda la cadena trófica
- Pueden volatilizarse a la atmósfera

La contaminación difusa de metales pesados se asocia con procesos que afectan a grandes áreas de terreno, como la deposición atmosférica, ciertas prácticas agrícolas y el inadecuado reciclaje de basuras y aguas residuales. La deposición atmosférica representa una de las mayores fuentes de metales pesados hacia el suelo (Mas y Azcue, 1993).

1.2.2. Tolerancia de las plantas hacia los metales pesados

El mecanismo de la tolerancia a los metales pesados por acción de las plantas está referido a la capacidad de adaptación de estos organismos a suelos con altas concentraciones de tóxicos y que generalmente se expresa regularmente con una interacción genotípica y el ambiente, lo que genera su sobrevivencia. Los sistemas referidos a la tolerancia se desarrollan en gran parte en el medio interno de las plantas: los metales son captados por estos organismos que se han desarrollado en medios ricos de metales, presentando una gran cantidad de mecanismos de adaptación tanto bioquímica como fisiológica generados en distintos niveles orgánicos y para diferentes tóxicos (Baker, 1981).

1.2.3. Contaminación por plomo en el suelo

El plomo (Pb) es un metal de color gris azulino de amplia distribución en la tierra y que por lo general se presenta en forma natural en pequeñas cantidades. Según lo informado por Volke (2005, p. 127):

Este elemento es uno de los más abundantes en la naturaleza, es generalmente obtenido de la galena (PbS), la anglesita (PbSO₄) y la curocita (PbCO₃). El Pb es tóxico para el sistema nervioso y se asocia con la depresión de muchas funciones endócrinas, aunque no hay evidencia de efectos teratogénicos o carcinogénicos. El uso más amplio que se le da a este metal es la fabricación de acumuladores; este elemento también es usado para la fabricación de tetraetilo de plomo, pinturas, cerámicas, forros para cables, elementos de construcción, vidrios especiales, pigmentos, soldadura suave y municiones.

El plomo se considera un contaminante ambiental, ya que, en concentraciones elevadas, suele ser tóxico para muchas especies, incluyendo al ser humano. La presencia en el ambiente está ligada a las actividades desarrolladas por el hombre como son: la industria, minería, fundición y al uso que se le dio como aditivo de gasolinas (Rodríguez *et al.*, 2006).

Los factores influyentes en la distribución de los metales pesados en el suelo están estrechamente relacionados con las características propias de cada suelo. Los parámetros determinantes son: el potencial de hidrógeno (pH), el potencial redox, el potencial de cambio, los carbonatos, el contenido de materia orgánica, la variación textural del suelo; así como las condiciones medioambientales como: procesos de acidificación, variaciones en la temperatura y variaciones en la humedad todas ellas relacionadas con los cambios redox (Rigol *et al.*, 2003).

1.2.4. El ajo (*Allium sativum*)

Es una planta que pertenece a la familia de las Amaryllidaceae. A la luz de los últimos trabajos, se trata de una planta con una taxonomía complicada. Posiblemente la forma original del ajo es la especie *Allium longicuspis* oriunda del centro y del este de Asia, de la que se conservan en la actualidad cultivares principalmente en Turquía y Armenia. Según la descripción de Maroto (2006, p. 204), el ajo presenta las siguientes características:

Planta bienal de raíces muy numerosas blancas, fasciculadas y poco profundas; el tallo está representado, igual que en la cebolla, por una masa aplastada que se llama disco. El bulbo está formado por una serie de unidades elementales o «dientes», recubiertos cada uno de ellos por una túnica protectora de color variable, y todo el bulbo, a su vez, de túnicas exteriores que forman conjuntamente una capa envolvente y que suelen ser de color blanquecino. Cuando las condiciones para la formación de bulbos son las adecuadas, en las axilas de las hojas más jóvenes (las situadas en el centro) aparecen yemas que forman los «dientes». Periféricamente hay unas doce hojas estériles que rodean al bulbo y no forman «yemas» en sus axilas, pero lo contornean y envuelven. El número de «dientes» formados en cada caso varía entre 2 - 3 y hasta más de 10, según el cultivar que se trate. Cada «diente» consta de dos hojas maduras y una yema vegetativa. Una de estas hojas, provista de una vaina cilíndrica, es la protectora, que se remata y queda abierta en el extremo, en una especie de resalte, mientras que la otra hoja es en realidad una vaina engrosada de sustancia de reserva y es precisamente en su interior y base donde existe una pequeñísima hojita que encubre el meristemo de crecimiento.

Cultivo del ajo

El ajo es una planta rústica que se desarrolla mejor en zonas de climas templados, pudiendo crecer también en climas fríos. Se le ha visto adaptándose muy bien a la climatología mediterránea. Se desarrolla notablemente con temperaturas comprendidas entre 8 y 20 °C,

debiendo ser las nocturnas inferiores a 16 °C. En cuanto a suelos, se adapta bien a cualquier tipo de terreno, requiriendo que este no esté ni muy húmedo ni muy pesado. Se desarrolla mejor en aquellos medios o ligeros, sin excesivo contenido en caliza. Es una planta moderadamente tolerante a la acidez del suelo y aunque suele considerarse permisiva con la salinidad, pero una salinidad excesiva repercute en dificultades para el crecimiento de raíces y en un menor tamaño de los bulbos (Maroto, 2006).

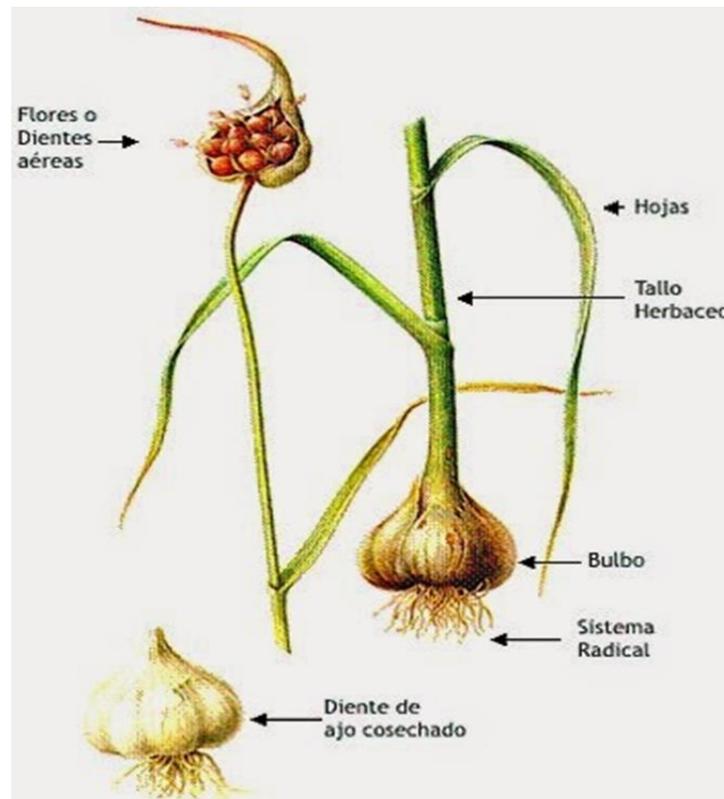


Figura 3. Aspectos morfológicos del ajo. Fuente: Gala (2015).

1.2.4. Mecanismos asociados a la extracción de metales pesados por plantas

Fitoestabilización mediada por plantas “excluseras”

El mecanismo de la fitoestabilización consiste en inmovilizar contaminantes presentes en el suelo, en especial metales pesados, usando para ello las plantas. Los principales procesos reconocidos para esta actividad son la absorción y acumulación en las raíces o adsorbidos a estructuras externas de la planta como los que se presenta en la rizosfera. El objetivo principal de la fitoestabilización es restaurar el suelo. Baker (1981) propuso llamar a las plantas que realizan esta actividad como plantas excluseras. Existen autores que no están de acuerdo con lo señalado por Baker, ellos expresan que ya de por si las raíces de las plantas

presentan un alto contenido de metales, por lo que no existiría una exclusión propia. Se establece que por este mecanismo las plantas pudieran limitar el transporte de metales pesados desde las raíces a diversos órganos aéreos de las plantas.

Los mecanismos que suceden en la restauración ecológica ayudan a la recuperación parcial o total del ecosistema dañado, para lo cual se genera biomasa vegetal en áreas estériles, dañadas o destruidas; esta vegetación de preferencia debe cubrir suelos, de manera tal que evite la migración de contaminantes, prevenir la erosión y lograr la estabilización física del suelo; esto conduce a que los suelos puedan aumentar su biodiversidad, aumentar su condición orgánica y su contenido de nutrientes, mejorando la condición del suelo antes afectado y dejando los contaminantes muchas veces inactivos (Barceló y Poschenrleder, 2003). Este complejo mecanismo reduce el transporte del metal en el suelo y su traslocación a los diversos órganos de la planta, lo que redundaría en la disminución natural de este contaminante en el ambiente (Wong, 2003).

Las plantas exclusoras se clasifican teniendo en cuenta ciertas condiciones, tal como sugieren Raskin y Ensley (2000) y son:

- Índice de translocación (FT) con valores por debajo de 1. Esto refleja una baja translocación de metales hacia los órganos aéreos de la planta, esto implica una gran acumulación de los metales en la zona correspondiente a las raíces de las plantas consideradas como fitoestabilizadoras.
- Una alta adaptación a concentraciones elevadas de metales pesados.
- Organismo con un largo ciclo de vida, que lo ubica dentro de las especies perennes.
- Además, estas plantas deben tener una alta habilidad para propagarse y ser de fácil adquisición comercial.

Fitoextracción mediante el uso de plantas “hiperacumuladoras”

Este mecanismo denominado también fitoacumulación, es un proceso que comprende la concentración y posterior traslocación de metales pesados de órganos inferiores a zonas altas de las plantas, permitiendo que contaminantes presentes en el suelo sean eliminados, tal como lo refiere Wong (2003). Esta técnica restauradora permite disminuir altas

concentraciones de metales pesados en suelos dejándolos con una aptitud agrícola mejorada. Esto permite ahorrar en tratamientos costosos que implican remover grandes cantidades de tierra y generar profundas excavaciones, con la consecuente generación de problemas ecológicos. Por lo tanto, el uso de especies hiperacumuladoras para el retiro de estos contaminantes permite innovar en lo referente a tecnologías de bajo costo amigable con el ambiente (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

Los metales pesados captados de manera significativa por las plantas hiperacumuladoras en los órganos aéreos pueden ser cosechados y eliminados como desechos contaminados o incinerados, tratamiento que se conoce como fitominería. Estas plantas no son muy abundantes en la naturaleza y se ubican principalmente en sitios con alta concentración de metales pesados, por lo que presentan una alta tolerancia y adaptación de estos contaminantes. Algunos estudios revelan que la pérdida de estas especies podría conllevar a un incremento de contaminantes en los suelos, toda vez que no haya poblaciones naturales de organismos capaces de reducir estos contaminantes (Reeves, 2006).

Las plantas hiperacumuladoras clasificadas recientemente son sólo poco más de 400 de las 290 000 especies vasculares descritas en esta década. Esto se relacionaría a un porcentaje menor al 0.2 % de las angiospermas. Tres cuartos de este grupo de especies vasculares (alrededor de 317 especies), son hiperacumuladoras del metal níquel a causa de la extensiva ocurrencia de suelos ultramáficos ricos en Ni encontrados en muchas partes del mundo (Reeves, 2006).

Recientemente, Chaney *et al.* (1997) han identificado especies hiperacumuladoras capaces de concentrar altas cantidades de metales, tal es el caso del Zn, pero también se ha visto a otras especies vegetales desarrollándose a las mismas condiciones y extrayendo cantidades variables de metal Zn. Ellos identificaron plantas como la “mostaza india” (*Brassica juncea*) y dentro de las asteráceas a el “girasol” (*Helianthus annuus*). Estas son modelos para este tipo de actividad fitoextractora, por tener la ventaja de un rápido desarrollo, una alta adaptación a los metales y acumular grandes cantidades de contaminantes, principalmente metales pesados.

Las plantas para ser consideradas hiperacumuladoras deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Almacenar altas cantidades de metales pesados en órganos aéreos con valores superiores a los 100 mg.kg⁻¹ (Baker y Brooks, 1989).
- Presentar un índice de bioacumulación superior a 1 y esto es el reflejo de lo acumulado por la planta con respecto a la raíz (Brooks, 1998).
- Poseer un factor de translocación mayor a 1, siendo este factor el reflejo del contenido de metales en órganos aéreos de la planta con respecto a la raíz (Brooks, 1998).

Investigadores como Kabata-Pendias y Pendias (2000) señalan que las plantas para ser consideradas hiperacumuladoras deben de cumplir y ser capaces de satisfacer la primera y tercera de las condiciones mencionadas. Reeves (2006) y otros investigadores sugieren que el índice de bioacumulación no refleja la tolerancia a acumular metales pesados, toda vez que muchas de las plantas tomadas para analizar este contaminante no han sido retiradas del suelo oportunamente.

Últimamente ha sido objeto de debate la importancia de la eficiencia en la hiperacumulación, es decir, que presenten una alta condición a la tolerancia a metales pesados o que tengan una gran adaptación para producir biomasa. Además, se establece que la condición para generar biomasa es un factor de menor importancia que la de hiperacumular, debido a que las plantas con alta biomasa, cuando están sometidos a altas concentraciones de metales pesados, tienden a disminuir su rendimiento, y por lo tanto a bajar su actividad extractora de metales pesados; mientras las plantas hiperacumuladoras no modifican su actividad extractora, mostrando una alta resistencia (Chaney *et al.*, 1997).

Las limitaciones de las plantas hiperacumuladoras generalmente es la escasa producción de biomasa que puede ser revertida por técnicas agronómicas como la fertilización. Existen diversos estudios para incrementar la biomasa en plantas acumuladoras de metales. Se tienen ejemplos en frutos de *Cucurbita pepo* C. Linneo que mediante el retiro de la flor femenina de la planta se da un aumento en la biomasa de la planta y por ende un incremento en el

índice de absorción del metal pesado. Otros estudios revelan que la acumulación de metales en los órganos aéreos se da cuando se presenta la floración, por lo que, para efectos de esta planta, se recomienda cosechar en este periodo (González, 2016).

Actualmente son de gran interés todos los mecanismos que impliquen la reducción de la toxicidad por contaminantes presentes en los suelos, la fitorremediación es una de ellas. Este mecanismo no es el único que demuestre la tolerancia, por parte de las plantas, a una gama de metales pesados, por lo que se considera que posiblemente esta actividad sea mediada por más de un gen presente en las plantas y que se desarrolló por un proceso de adaptación evolutivo a estos contaminantes. En este sentido, la mejora de la planta en esta actividad fitorremediadora, implicaría a su vez cambios genéticos con sus respectivas consecuencias indirectas, como la resistencia a herbicidas y un desarrollo mayor sobre las especies nativas que podrían ser desplazadas, con la consecuente pérdida en la biodiversidad (Macnair, 2002).

Otro factor importante que considerar en esta actividad de fitoextracción, es el uso de plantas indígenas o nativas, estas plantas presentan ventajas sobre otras principalmente por la adaptación a ambientes extremos en donde viven. La supervivencia en este hábitat, muchas veces con condiciones climáticas muy variantes, las ubican como candidatas a ser consideradas potenciales fitorremediadoras. En resumen, la actividad fitorremediadora que se aplique a cualquier suelo contaminado, haciendo uso de plantas hiperacumuladoras, serán de mucha importancia económica, ya que permitiría la reutilización de suelos no aptos para la agricultura u otra actividad rentable. También, este beneficio se puede observar desde un enfoque ecológico donde las zonas recuperadas de estos contaminantes podrán albergar otras poblaciones que interactúen y generen un aumento de la biodiversidad (Williamson y Johnson, 1982).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

La presente investigación presentó un diseño descriptivo lo que implicó observar y describir el comportamiento del factor de bioconcentración y transferencia de plomo en suelo - planta en el cultivo de “ajo” (*Allium sativum* L.) en zonas agrícolas del centro poblado Ruquia. Así mismo presentó un enfoque cuantitativo. El alcance de la investigación correspondió a un estudio descriptivo y correlacional según Hernández, *et al.* (2010).

2.1.1. Lugar y fecha

Las muestras para la presente investigación fueron extraídas de la localidad del Centro Poblado de Ruquia, Provincia de Huaura departamento de Lima. Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae – Sede Lima. La investigación tuvo una duración aproximada de seis meses desde diciembre del 2018 mayo del 2019.

2.1.2. Población y muestra

Población

La población de la presente investigación estuvo conformada por las plantas presentes en 2.0 hectáreas de “ajo” (*Allium sativum* L.) de la localidad de Ruquia.

Muestra

Los puntos mínimos de muestreo de suelos fueron considerados según el cuadro desarrollado en la guía de muestreo de suelos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014) que se detalla en el Apéndice 1. Las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo se observan en la Tabla 1 y la Figura 4.

Según las coordenadas indicadas en la Tabla 1, la parcela Ruquia Centro, corresponde a los puntos de muestreo del 1 al 6 , los cuales se ubican a 1.5 km de la playa Ruquia y a 2.8 km al sur de la Ciudad de Vequeta. Los puntos de muestreo del 7 al 15 corresponden al Fundo Calera.

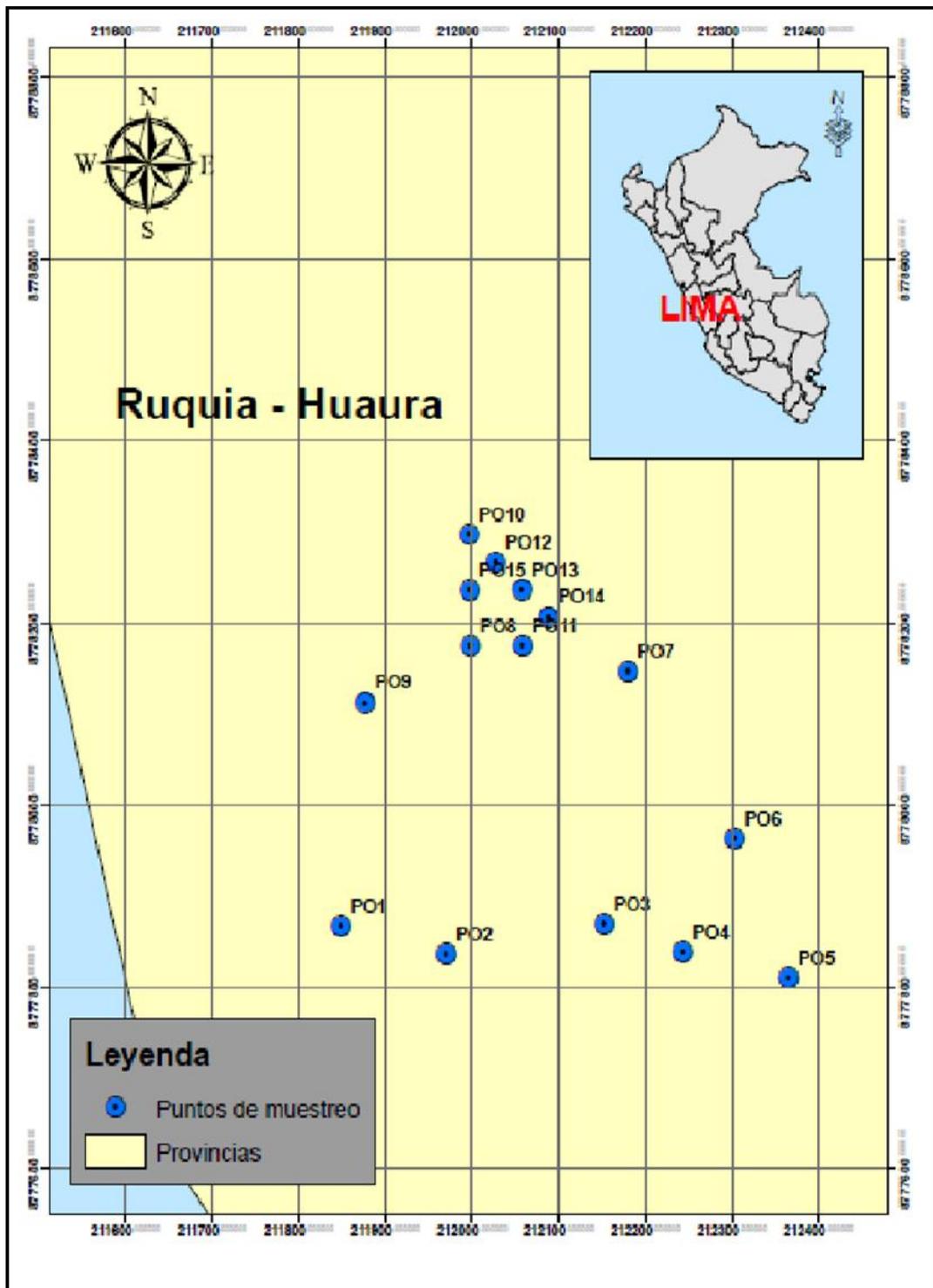


Figura 4. Puntos de muestreo en la localidad de Ruquia – Huaura. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1

Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo establecidos en la localidad de Ruquia – Huaura

Punto de muestreo	Coordenadas	
1	788152.2	8777866.6 W
2	788030.5	8777836.3 W
3	787848.5	8777868.7 W
4	787757.1	8777838.7 W
5	787635.4	8777809 W
6	787697.5	8777962.2 W
7	787820.6	8778145.6 W
8	788003.1	8778174.8 W
9	788124.0	8778112.2 W
10	788004.2	8778297.7 W
11	787942.4	8778175.3 W
12	787973.5	8778267.3 W
13	787942.9	8778236.8 W
14	787912.3	8778206.3 W
15	788003.6	8778236.3 W

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Descripción de la investigación

2.2.1. Fase preliminar

Esta fase comprendió las siguientes actividades:

- Preparación de materiales y herramientas; así como la planificación, recopilación y análisis de la información básica existente de la zona con referencia a la ubicación medio de acceso y características climáticas.
- Elaboración del Mapa Base con la ubicación de las calicatas consideradas como puntos de muestreos y de donde se extrajeron las muestras de ajo.

2.2.2. Fase de campo

Recolección de la muestra de suelo

Las muestras de suelo fueron recolectadas siguiendo la guía de muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente para suelos agrícolas (MINAM, 2014) y se registró en el Formato para Recolección de Muestras (Apéndice 6). Esta consistió en realizar calicatas con una profundidad de aradura (30 cm) en el suelo, con una pala de acero inoxidable en cada punto establecido, extrayéndose la muestra de suelo (a profundidad radicular) y simultáneamente se recolecto las plantas de ajo. La cantidad de suelo extraída (5 kg aproximadamente) fue depositada en bolsas de polietileno denso, las cuales fueron rotuladas, registradas y trasladadas al laboratorio en bolsas plásticas para su respectivo procesamiento y análisis. Las muestras de suelo fueron secadas en bandejas de papel a condiciones ambientales en el interior del laboratorio durante 2 semanas. Posteriormente fueron tamizadas utilizando tamices metálicos de 2 mm para retirar las gravas mayores de la muestra, seguidamente fueron mezcladas uniformemente.

Recolección de las muestras vegetales

Las plantas de ajo fueron extraídas siguiendo el criterio de Garrido *et al.* (2013), que considera principalmente cobertura vegetal y síntomas de fitotoxicidad. Posteriormente cada planta fue lavada cuidadosamente procurando no dañar sus estructuras, una vez limpias fueron secadas en una estufa a una temperatura de 60 °C durante 4 días, seguidamente se separó la raíz y el bulbo de la planta en estudio para su análisis independiente.

2.2.3. Fase de laboratorio

Caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo y planta

a. Muestras del suelo

Sobre las muestras de suelo se determinó los parámetros propuestos por Olvera *et al.* (2008), que sugieren el análisis de los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica. Para la determinación del metal pesado plomo se siguió la metodología descrita por Westerman (1990), quien sugiere someter al suelo una solución de EDTA al 0.05 M a

pH de 7.0 en una relación suelo: solución extractora de 4:1 (p/v). Seguidamente esta fue medida por la técnica de fotometría.

b. Planta de ajos

Para la extracción del metal pesado plomo se siguió la metodología descrita por Bradford *et al.* (1975), quien sugiere realizar una digestión previa de los tejidos con ácido nítrico y perclórico en una relación de 1:1. La cuantificación se realizó por fotometría siguiendo las recomendaciones del fabricante WTW®. Todas las muestras fueron analizadas por triplicado.

Determinación del factor de bioconcentración (FBC)

Se determinó el Factor de Bioconcentración con los resultados de concentración recuperados de las distintas estaciones. Este factor se define como la relación de las concentraciones del metal en las raíces y en el suelo. Se calcula de la siguiente manera (León, 2017):

$$FBC = \frac{[METAL]raíz}{[METAL]suelo}$$

Donde:

FBC: Factor de bioconcentración. Este factor muestra el paso de los metales pesados de la raíz a las plantas. Si es mayor a 1 significa existe el mecanismo de concentración en el bulbo.

Determinación del factor de transferencia (FT)

Se determinó el factor de transferencia de la planta en cada punto de muestreo. Este factor indica el tipo de respuesta de la planta al metal y donde se acumulan los metales. Se calculó mediante la siguiente fórmula (León, 2017):

$$FT = \frac{[METAL]bulbo}{[METAL]raíz}$$

Donde:

FT: Factor de Transferencia

Valores a $FT > 1$ se considera planta hiperacumuladora.

Valores de $FT < 1$ se considera no acumuladora o fitoestabilizadora.

2.3. Identificación de variables y su mensuración

Las variables de supervisión que fueron identificadas fueron las siguientes:

2.3.1. Transferencia de plomo en suelos y planta

Concentración de plomo

Para la medición de la concentración de plomo (mg.kg^{-1}) en suelos se usó un equipo fotométrico (photoflex WTW®) cuyo rango de medición está calibrado en 0.02 - 5.0 mg.l^{-1} .

Medición de pH

Para la medición del pH se usó el potenciómetro pH de laboratorio debidamente calibrado.

Medición de la conductividad eléctrica

Para la medición de conductividad (mS.cm^{-1}) del suelo inicialmente se preparó la pasta saturada y se extrajo el extracto en un filtro a presión. Posteriormente en el extracto se leyó la conductividad haciendo uso del conductímetro.

Materia Orgánica en %

Para la medición de la materia orgánica del suelo se realizó el secado en estufa a 110°C por 2 horas, para luego ser calcinado a 600 °C usando la mufla.

2.3.2. Bioconcentración de plomo en la planta

Factor de bioconcentración

Los valores están en el rango de 0 – 1. Las variables de la investigación están detalladas en la Tabla 2:

Tabla 2

Variable en estudio, unidades de medida y método de análisis

Variable en estudio	Dimensiones Factor de estudio	Unidad de medida	Método
Transferencia de plomo suelo - planta	pH en suelos	mg.kg ⁻¹	Fotometría
	Conductividad eléctrica	Rangos de pH	Método potenciómetro
	Materia orgánica	μS.cm ⁻¹	
Bioconcentración de plomo en la planta	Factor bioconcentración	%	Ignición
		Rango de 0-1	Fotometría

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Análisis estadístico de datos

Los datos obtenidos fueron procesados en el programa Microsoft Excel para obtener las tablas que permitieron analizar la dinámica de los parámetros analizados en la investigación. Se empleó el cociente de correlación de Pearson para determinar el grado de asociación entre los valores cuantitativos con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 22.0 para el cálculo de los estadísticos descriptivos.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Caracterización fisicoquímico de las muestras de suelo

3.1.1. Determinación del pH de los suelos

La Tabla 3 muestra los valores promedio de tres valores de pH de los suelos en los 15 puntos de muestreo en la localidad de Ruquia. El valor mínimo de pH fue en el punto de muestreo PO9 con 6.2 ± 0.2 , ligeramente ácido y el valor máximo de pH de 8.3 ± 0.3 , ligeramente alcalino para el punto PO6.

Tabla 3

Valores promedio de pH obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo

Punto de muestreo	pH
PO1	7.8 ± 0.76
PO2	7.8 ± 0.03
PO3	7.9 ± 0.005
PO4	8.3 ± 0.10
PO5	8.0 ± 0.05
PO6	8.3 ± 0.3
PO7	7.6 ± 0.2
PO8	6.4 ± 0.3
PO9	6.2 ± 0.2
PO10	7.9 ± 0.1
PO11	8.1 ± 0.1
PO12	8.2 ± 0.2
PO13	7.8 ± 0.0
PO14	7.9 ± 0.1
PO15	6.9 ± 0.2

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Obtención de los valores promedios del porcentaje de materia orgánica del suelo

La Tabla 4 muestra los valores promedio del porcentaje de materia orgánica de los suelos en los 15 puntos de muestreo en la localidad de Ruquia. El valor mínimo del porcentaje de materia orgánica fue de 1.63 ± 0.2 correspondiente al PO10 y el valor máximo del porcentaje de materia orgánica fue de 2.93 ± 0.17 correspondiente a la estación PO14.

Tabla 4

Valores promedio del % de materia orgánica obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo

Punto de muestreo	% Materia orgánica
PO1	2.53 ± 1.52
PO2	2.33 ± 0.57
PO3	2.63 ± 0.57
PO4	2.70 ± 1.0
PO5	2.50 ± 1.05
PO6	2.20 ± 1.0
PO7	2.16 ± 0.5
PO8	1.90 ± 0.2
PO9	1.83 ± 0.08
PO10	1.63 ± 0.2
PO11	2.40 ± 0.1
PO12	2.80 ± 0.73
PO13	2.70 ± 0.2
PO14	2.93 ± 0.17
PO15	2.03 ± 0.07

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Obtención de los valores de conductividad eléctrica de los suelos

La Tabla 5 muestra los valores promedio de la conductividad eléctrica (CE) de los suelos en los 15 puntos de muestreo en la localidad de Ruquia. El valor mínimo de la CE del suelo de $0.13 \pm 0.015 \text{ mS.cm}^{-1}$ correspondiente al PO7. Valores altos de la CE se registró para el PO1, PO2, PO3 y PO9 con valores de conductividad promedio de 1.03 ± 0.06 ; 0.91 ± 0.02 ; 0.88 ± 0.01 y $0.81 \pm 0.065 \text{ mS.cm}^{-1}$ respectivamente.

Tabla 5

Valores promedio de la conductividad eléctrica (mS.cm^{-1}) obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo

Punto de muestreo	Conductividad
PO1	1.03 ± 0.06
PO2	0.91 ± 0.02
PO3	0.88 ± 0.01
PO4	0.36 ± 0.032
PO5	0.30 ± 0.01
PO6	0.22 ± 0.020
PO7	0.13 ± 0.015
PO8	0.21 ± 0.01
PO9	0.81 ± 0.065
PO10	0.38 ± 0.06
PO11	0.26 ± 0.16
PO12	0.27 ± 0.02
PO13	0.17 ± 0.05
PO14	0.29 ± 0.02
PO15	0.21 ± 0.05

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Concentración de plomo en los suelos

La Tabla 6 muestra los valores promedio de la concentración de plomo de los suelos en los 15 puntos de muestreo en la localidad de Ruquia. Los valores mínimos de plomo fueron de 5.1 ± 1.5 y 5.1 ± 2.0 mg.kg^{-1} para los puntos de muestreo PO14 y PO8 respectivamente, y el valor máximo se registró en el punto de muestreo P09 con 9.8 ± 2.02 mg.kg^{-1} de plomo.

Tabla 6

Valores promedio de la concentración de plomo (mg.kg^{-1}) obtenidos de las muestras de suelos en los distintos puntos de muestreo

Punto de muestreo	Plomo (mg.kg^{-1})
PO1	8.0 ± 0.5
PO2	7.6 ± 0.37
PO3	6.3 ± 0.35
PO4	8.7 ± 0.64
PO5	7.7 ± 0.15
PO6	7.7 ± 0.47
PO7	5.6 ± 0.36
PO8	5.1 ± 2.0
PO9	9.8 ± 2.02
PO10	9.2 ± 1.7
PO11	5.9 ± 0.9
PO12	8.83 ± 1.6
PO13	7.28 ± 0.20
PO14	5.10 ± 1.5
PO15	7.6 ± 1.09

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Concentración de plomo en las diferentes partes de la planta de “Ajo”

3.3.1. Concentración de plomo en la raíz del “ajo”

La Tabla 7 muestra los valores promedio de la concentración de plomo en la muestra de raíz de las plantas extraídas de los 15 puntos de muestreo en la localidad de Ruquia. Los valores mínimos de plomo fueron 1.13 ± 0.15 y 1.16 ± 0.20 mg.kg⁻¹ para las raíces de las plantas extraídas de los puntos de muestreo PO5 y PO11 respectivamente, y los valores máximos se registraron en las raíces de las plantas extraídas en los puntos de muestreo PO9 y PO8 con 2.1 ± 0.30 y 1.9 ± 0.1 mg.kg⁻¹ de plomo.

Tabla 7

Valores promedio de la concentración de plomo (mg.kg⁻¹) obtenidos de las muestras de raíces de plantas extraídas de suelos en los distintos puntos de muestreo en la localidad de Ruquia

Muestra de Raíz	Plomo
PO1	1.7 ± 0.10
PO2	1.68 ± 0.10
PO3	1.44 ± 0.57
PO4	1.23 ± 0.15
PO5	1.13 ± 0.15
PO6	1.26 ± 0.057
PO7	1.66 ± 0.11
PO8	1.9 ± 0.10
PO9	2.1 ± 0.30
PO10	1.4 ± 1.10
PO11	1.16 ± 0.20
PO12	1.2 ± 0.17
PO13	1.56 ± 0.15
PO14	1.7 ± 0.57
PO15	1.3 ± 0.11

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Concentración de plomo en el bulbo

La Tabla 8 muestra los valores promedio de la concentración de plomo en la muestra de bulbo de las plantas extraídas de los 15 puntos de muestreo en la localidad de Ruquia. Los valores mínimos de plomo fueron 0.22 ± 0.01 y 0.22 ± 0.25 mg.kg^{-1} para los bulbos de las plantas extraídas de los puntos de muestreo PO6 y PO12 respectivamente. Los valores máximos se registraron en los bulbos de las plantas extraídas en los puntos de muestreo PO9 y PO8 con 0.73 ± 0.057 y 0.73 ± 0.052 mg.kg^{-1} de plomo respectivamente.

Tabla 8

Valores promedio de la concentración de plomo (mg.kg^{-1}) obtenidos de las muestras de bulbo del ajo extraídas de suelos en los distintos puntos de muestreo en la localidad de Ruquia

Muestra Bulbo	Concentración de plomo (mg.kg^{-1})
1	0.697 ± 0.01
2	0.672 ± 0.07
3	0.432 ± 0.041
4	0.3198 ± 0.09
5	0.2712 ± 0.02
6	0.22 ± 0.01
7	0.498 ± 0.08
8	0.73 ± 0.052
9	0.73 ± 0.057
10	0.448 ± 0.032
11	0.3248 ± 0.09
12	0.22 ± 0.25
13	0.4992 ± 0.04
14	0.408 ± 0.09
15	0.689 ± 0.06

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Obtención de factor de bioconcentración

La Tabla 9 muestra los valores promedio del Factor de Bioconcentración (FBC) obtenido entre la concentración del metal presente en la raíz y la concentración del metal presente en el suelo. Los menores valores del FBC fueron para las muestras (raíz/suelo) 5 y 4 con 0.14 ± 0.005 y 0.14 ± 0.02 respectivamente. Los máximos valores de FBC fueron para las muestras 8 y 7 con 0.37 ± 0.025 y 0.37 ± 0.01 respectivamente.

Estos resultados de la Bioconcentración de Plomo (Pb) en la planta de ajo significan que son plantas indicadoras o exclusoras para el metal pesado plomo.

Tabla 9

Valores promedio del Factor de Bioconcentración (FBC) obtenido entre la concentración del metal presente en la raíz y la concentración del metal presente en el suelo

Muestra	Factor de bioconcentración
1	0.21±0.01
2	0.22±0.006
3	0.22±0.015
4	0.14±0.02
5	0.14±0.005
6	0.17±0.01
7	0.3±0.01
8	0.37±0.025
9	0.21±0.01
10	0.15±0.01
11	0.19±0.01
12	0.12±0.05
13	0.21±0.02
14	0.32±0.057
15	0.17±0.020

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Obtención de factor de transferencia

La Tabla 10 muestra los valores promedio del Factor de Transferencia (FT) obtenido, entre la concentración del metal presente en los bulbos y la concentración del metal presente en la raíz. Los menores valores del FT fueron para las muestras (bulbo/raíz) 6 y 12 con 0.17 ± 0.01 y 0.17 ± 0.02 respectivamente; mientras que los máximos valores de FT fueron para las muestras 15 y 1 con 0.53 ± 0.02 y 0.41 ± 0.01 respectivamente.

Los resultados significan que la planta de ajo estudiada no es Hiperacumuladora del metal pesado Plomo (Pb), considerándosele como planta Fitoestabilizadora.

Tabla 10

Valores promedio del Factor de Transferencia (FT) obtenido entre la concentración del metal presente en el bulbo y la concentración del metal presente en la raíz

Muestra	Factor de transferencia
1	0.41 ± 0.01
2	0.40 ± 0.005
3	0.30 ± 0.01
4	0.26 ± 0.02
5	0.24 ± 0.015
6	0.17 ± 0.01
7	0.3 ± 0.02
8	0.38 ± 0.015
9	0.34 ± 0.015
10	0.32 ± 0.05
11	0.28 ± 0.02
12	0.17 ± 0.02
13	0.32 ± 0.015
14	0.24 ± 0.020
15	0.53 ± 0.020

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Análisis de la correlación de Pearson de las variables cuantitativas

La Tabla 11 muestra los resultados del análisis de la correlación de Pearson de las variables cuantitativas obtenidas en la investigación. Se encontraron correlaciones positivas significativas entre la materia orgánica y los valores de pH ($r=0.560$; $P=0.000$), conductividad eléctrica y concentración de plomo en el bulbo ($r=0.44$; $P=0.002$), conductividad eléctrica y el factor de transferencia ($r=0.296$; $P=0.048$), concentración de plomo en bulbo y factor de transferencia ($r=0.828$; $P=0.00$), concentración de plomo en el bulbo y concentración de plomo en raíz ($r=0.697$; $P=0.00$) y factor de transferencia con la concentración de plomo en raíz ($r=0.373$; $P=0.00$).

Se presentaron correlaciones negativas significativas de la concentración de plomo en la raíz con los valores de pH ($r=-0.665$; $P=0.000$), la concentración del plomo en el bulbo y los valores de pH ($r=-0.719$; $P=0.00$), factor de bioconcentración y los valores de pH ($r=-0.453$; $P=0.002$), factor de transferencia y los valores de pH ($r=-0.600$; $P=0.000$), concentración de plomo en raíz y materia orgánica ($r=-0.297$; $P=0.048$), factor de transferencia con los valores de materia orgánica ($r=-0.409$; $P=0.005$) y concentración de plomo en suelo con el factor de bioconcentración ($r=-0.650$; $P=0.00$).

El Apéndice 5 muestra los diagramas de dispersión de todas las correlaciones significativas en donde se aprecia que la menor dispersión de valores se observa con la concentración del plomo en el bulbo y Factor de transferencia ($r=0.82$, $P<0.05$).

Tabla 11

Análisis de correlación de Pearson de las variables cuantitativas (FBC= Factor de Bioconcentración)

		Ph	Conduc-tividad	Materia orgánica	Plomo en suelo	Plomo en raíz	Plomo en bulbo	FBC
Conductividad	Correlación de Pearson	-0.100						
	Sig. (bilateral)	0.513						
Materia orgánica	Correlación de Pearson	0.560**	0.006					
	Sig. (bilateral)	0.000	0.968					
Plomo en suelo	Correlación de Pearson	0.041	0.234	-0.172				
	Sig. (bilateral)	0.790	0.122	0.258				
Plomo en raíz	Correlación de Pearson	-0.665**	0.326*	-0.297*	-0.074			
	Sig. (bilateral)	0.000	0.029	0.048	0.628			
Plomo en bulbo	Correlación de Pearson	-0.719**	0.444**	-0.402**	-0.033	0.697**		
	Sig. (bilateral)	0.000	0.002	0.006	0.831	0.000		
Factor de bioconcentración	Correlación de Pearson	-0.453**	-0.049	-0.066	-0.650**	0.623**	0.447**	
	Sig. (bilateral)	0.002	0.750	0.667	0.000	0.000	0.002	
Factor de transferencia	Correlación de Pearson	-0.600**	0.296*	-0.409**	-0.029	0.373*	0.828**	0.213
	Sig. (bilateral)	0.000	0.048	0.005	0.852	0.012	0.000	0.160

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo

Los resultados obtenidos de la caracterización de los suelos con capacidad agrícola de la localidad de Ruquia- Huaura fueron evaluados siguiendo diversas normas de calidad extranjeras, dado que en el Perú los estándares de calidad ambiental no contemplan algunos parámetros fisicoquímicos.

Uno de los factores que influye en la acumulación y disponibilidad de los metales pesados en el suelo, principalmente al plomo, es el pH. Este parámetro evaluado en esta investigación registró valores cuyo rango fue de 6.2 ± 0.2 a 8.3 ± 0.3 en los puntos de muestreo PO9 y PO6, respectivamente. El valor óptimo de parámetro no está contemplado en la Norma de Calidad Ambiental de Perú, pero no está muy alejado de los valores recomendados para suelos de uso agrícola de acuerdo a la norma canadiense que indica un rango de 6-8 como valores idóneos para la protección de la salud ambiental y humana (Canadian Council of Ministers of the Environment [CCME], 1999). Al respecto, De la Cruz (2018), también evaluó la presencia de plomo en suelos con alta producción agrícola en la localidad de Carapongo – Chosica, reportando valores del metal pesado de 10.24 a 12.48 mg.kg^{-1} en suelos con un pH ligeramente alcalino (7.73 - 7.84); la presencia del plomo fue relacionada con el mal manejo de fertilizantes y por el riego de con aguas conteniendo trazas de este metal. Además, se tiene conocimiento que el pH es uno de los parámetros que permite establecer el movimiento de los metales pesados, y especialmente al plomo (Wong, 2003). En esta investigación, se ha observado una alta movilidad de iones metálicos en suelos con pH bajos registrados en tres puntos de muestreo con valores de pH ácidos de 6.2; 6.4 y 6.9. Los demás puntos de muestreo presentaron un carácter alcalino. En términos generales, un incremento del pH del suelo genera una disminución de la solubilidad de los metales pesados.

La conductividad es uno de los parámetros influyentes en la evaluación de la toxicidad de suelos con fuerte absorción de metales pesados, los efectos de salinidad podrían contribuir significativamente a la disponibilidad de metales y su toxicidad, tal como lo refiere Stevens *et al.* (2003) al evaluar suelos con conductividades de 0.06 a 0.55 mS.cm⁻¹. En la presente investigación la conductividad eléctrica del suelo estuvo en el rango de 0.13 a 1.3 mS.cm⁻¹. También, De la Cruz (2018) registró valores de conductividad entre 1.59 a 1.73 mS.cm⁻¹. Al igual que lo reportado en esta investigación, estos valores se encuentran dentro de los estándares de calidad ambiental para suelos según la norma para suelos de Canadá, que refiere valores menores de 2.0 mS.cm⁻¹ en los suelos destinados a la agricultura. Por lo expuesto, se determina que se trata de suelos no salinos y que no generaría problemas directos a las plantas ya que los suelos con elevada salinidad impiden el desarrollo de las plantas.

La materia orgánica es otro de los factores importantes en la estructura de los suelos y juega un gran papel en las diferentes etapas de adsorción del suelo. En la presente investigación se obtuvo valores de 1.63 a 2.93 % de materia orgánica en los suelos de Ruquia. Valores por encima del 1.0 % de la materia orgánica en suelos puede deberse a que el origen de los nutrientes, que generalmente son la materia orgánica, sean también fertilizantes, tal como lo refiere Marchese (2015), quien evaluó fisicoquímicamente suelos agrícolas para estimar la salinización. Por otro lado, De la Cruz (2018), reportó valores de 2.63 a 3.39 % de materia orgánica, que asoció con los valores de plomo encontrados en suelos agrícolas que recibieron una aplicación constante de plaguicidas. Por lo tanto, se evidencia la necesidad de la evaluación de la materia orgánica en los suelos con presencia de plomo, ya que el proceso de acomplejación permitiría una mayor retención del metal pesado, permitiendo una mayor distribución a las plantas.

4.2. Concentración de plomo en los suelos

Los resultados de la presente investigación indican que la presencia de plomo en los suelos evaluados de la localidad de Ruquia son bajos, siendo su rango de 5.1 a 9.8 mg.kg⁻¹ y se encuentran dentro de los valores aceptados por los Estándares de Calidad Ambiental para Suelos mediante el Decreto Supremo N° 011-2017 (Ministerio del Ambiente [MINAM],

2017) (ver Apéndice 2), que acepta como mínimo el valor de 70 mg.kg^{-1} de plomo en suelos. Similares resultados han sido reportados por Flores (2018), al evaluar suelos agrícolas cercanos a la cuenca del río Huaura, quien realizó una caracterización química del suelo de una profundidad de 20 cm y reportó un contenido de 10 mg.kg^{-1} de plomo en suelos. También, contenidos mayores de plomo en suelos aledaños a industrias, han sido reportados en la localidad de Ñana, Chaclacayo, por Oriundo y Robles (2009), ellos muestran valores de hasta 97.9 mg.kg^{-1} de plomo en estos suelos agrícolas. La presencia de metales pesados en suelos agrícolas son originadas por las actividades humanas, en las que se tienen la aplicación de productos químicos agrícolas y lodos residuales que presentan principalmente el metal pesado plomo, tal como lo refiere Kabata-Pendias y Pendias (2000). Asimismo, Cárdenas (2011) evaluó los efectos adversos de los factores antrópicos sobre la calidad ambiental de la ciudad de Huacho, concluyendo de esa investigación que uno de los principales factores de riesgo por metales pesados es el mal uso de los agroquímicos aplicados por los pobladores. Esta investigación contrasta con las investigaciones realizadas por Prieto (2011), quien indica que la exposición a agroquímicos como sistema convencional o la aplicación de excremento de ciertos animales al suelo podría generar un incremento de plomo en el suelo. La presencia de plomo en el suelo va a permitir que sea rápidamente captado y acumulado por las plantas, generándose una alta contaminación de este cultivo. Por ello es probable que la presencia del metal pesado plomo en los suelos de Huaura esté relacionada, en una mayor proporción, a la actividad agrícola local.

4.3. Factor de bioconcentración y transferencia del plomo

Los resultados de la concentración de plomo en las muestras vegetales y en las muestras de suelo fueron fundamentales para el cálculo y el análisis del factor de bioconcentración (relación entre la concentración del metal pesado en la raíz de la planta y la concentración del mismo elemento en el suelo) y del factor de transferencia (relación entre la concentración del metal pesado en la parte aérea y la concentración del mismo elemento en sus raíces); así las concentraciones del plomo en las raíces del ajo registraron valores entre 1.13 a 2.1 mg.kg^{-1} , mientras que la concentración de plomo en el bulbo estuvo entre 0.22 y 0.73 mg.kg^{-1} , observándose una mayor acumulación de plomo en las raíces del ajo que en el bulbo. Según Ñañez (2016), estos datos permiten clasificar el “ajo” (*Allium sativum L.*) por el factor de bioconcentración (FBC) como una especie indicadora, esta condición se logra por cuanto la concentración de plomo en suelos fue mayor a la de la raíz. Por otro lado, los

resultados del Factor de Traslocación (FT) fueron entre 0.14 a 0.37, esto permitió clasificar a esta planta como alto potencial fitoestabilizador al presentar un $FT < 1$, tal como lo propone Backer y Brooks (1989). Los resultados recuperados en la presente investigación son de gran interés ya que la presencia del plomo en suelos y vegetales es considerada como uno de los mayores problemas ambientales del mundo moderno (Body *et al.*, 1991). El análisis de la concentración de plomo en el ajo cultivado en la localidad de Ruquia, ha revelado poca movilidad del metal del suelo hacia la planta, reteniéndola en la raíz y presentando una limitada traslocación a órganos aéreos.

Se han evaluado el contenido de plomo en otras especies vegetales; así León (2017), realizó investigaciones con el Junco (*Juncus arcticus*) en las que se han reportado valores del Factor de Traslocación de 0.88 lo que es clasificada como fitoestabilizadora y el factor de Bioconcentración de 0.57 que también la ubica como indicadora. Es por ello que, para evaluar el carácter acumulador de una planta, con respecto a un metal determinado tienen que considerarse ambos factores (FBC y FT), tal como se realizó en la presente investigación.

Es importante destacar que el “ajo” (*Allium sativum* L.) es una planta con propiedades medicinales y nutritivas. Su uso podría ocasionar algún riesgo para la población si se desarrolla en suelos contaminados con alta concentración de metales pesados. Al respecto, Kabata-Pendias y Pendias (2000) señalan que muchas plantas medicinales, que poseen la cualidad de ser curativas gracias a compuestos orgánicos como glucósidos o alcaloides, pueden acumular elevadas cantidades de metales pesados; un ejemplo de estas es “Dandelium” *Taraxacum officinalis*. Por otro lado, se han hecho investigaciones en otras plantas de interés comercial, tal como lo realizó Pila (2016) quien trabajó con cultivos de hortalizas (lechuga y zanahoria) obteniendo, como resultado de la evaluación, una alta concentración del metal pesado plomo en las plantas analizadas. La presencia del plomo es atribuida a la deposición generada durante la fertilización de la planta. El autor comunica que gran cantidad de las especies hortícolas están contaminadas por plomo debido a la exposición con agroquímicos usados para controlar plagas en los cultivos. Además, puede provenir por ejemplo del uso prolongado de compost y el estiércol, al aplicarse por largos períodos. Estos resultados también son compatibles con Tena (2013) quien realizó

investigaciones con betarraga en suelos cercanos a zonas industriales, encontrando valores elevados de plomo en el suelo con un promedio de $135.84 \text{ mg.kg}^{-1}$. Esta alta concentración fue atribuida al uso de agroquímicos como son los pesticidas y fertilizante, además del estiércol y aguas que contienen trazas de metales y causaría un incremento de la concentración de plomo en el suelo, los iones metálicos son ingresados por las plantas desde las raíces hasta los órganos superiores como tallos hojas y fruto. Por lo tanto, el ajo podría ser un cultivo que represente un alto riesgo de contaminación por el metal plomo, al acumularlo y ser usado para consumo humano.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Los parámetros de pH (6.2-8.3) y conductividad eléctrica ($0.13-1.3 \text{ mS.cm}^{-1}$) de los suelos analizados lograron cumplir con la Norma Canadiense para suelos agrícolas, mientras que los valores determinados para la materia orgánica estuvieron en el rango de 1.63 a 2.93 % en los suelos de Ruquia, pudiendo estos nutrientes tener origen en la incorporación de fertilizantes al suelo e influir en la acumulación del plomo en el cultivo de ajo.
2. La presente investigación realizada a los suelos agrícolas de la localidad de Ruquia - Huaaura, es una de las primeras que se realizan en el contexto de evaluar el contenido de plomo y su transferencia al “ajo” *Allium sativum L.*, encontrándose la presencia de plomo en los distintos puntos de muestreo, cuyos valores de concentración del metal pesado mínimos y máximos fueron 5.1 ± 1.5 y $9.8 \pm 2.02 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente.
3. El “ajo” presentó como factor de bioconcentración (FBC) el valor máximo de 0.37 lo que la ubica como una especie indicadora para el metal plomo. Por otro lado, los resultados del Factor de Traslocación (FT) fueron entre 0.14 a 0.37, esto permitió clasificar a esta planta como de alto potencial fitoestabilizador, que por el contenido de plomo presente en las raíces sugiere que esta planta incluye este metal a la rizosfera.
4. El contenido del metal pesado plomo en bulbo de la planta de “ajo” y el Factor de Transferencia presentaron una alta correlación ($r=0.82$, $P<0,005$) lo que implica una alta intensidad de asociación entre estas variables cuantitativas.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Dado el interés se sugiere la ampliación del presente estudio con otros de carácter experimental, donde se pueda evaluar el desarrollo de la planta a dosis de plomo en suelo en un ambiente controlado.
2. Se recomienda hacer un monitoreo periódico para evaluar los niveles de plomo presente en suelos de cultivos aledaños.
3. Se recomienda determinar la presencia de plomo en otras especies hortícolas que se siembran y comercializan en Huaura y alrededores, en la que se determine los cambios fenotípicos del cultivo desde la raíz hasta las hojas.

REFERENCIAS

- Alcoba, P. (2014). Transferencia de elementos trazas suelo-planta en suelos con influencia salina. *Congreso Nacional del medio ambiente (CONAMA)*. España. Recuperado de <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711457.pdf>
- 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.
- Aprueban Guía para el Muestreo de Suelos y Guía para la Elaboración de Planes de Descontaminación de Suelos. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 09 de abril de 2014, pp. 520574- 520575.
- Baker, A. (1981). Accumulators and excluders- strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of plant nutrition*, 3(1-4), 643-654. doi:10.1080/01904168109362867
- Baker, A., y Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1, 81-126. Recupeado de https://www.researchgate.net/profile/Alan_Baker2/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution_E/links/004635368aaa870046000000.pdf
- Barceló, J., y Poschenrleder, C. (2003). Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to Science*, 2(3), 333-344. Recuperado de revistes.iec.cat/index.php/CtS/article/download/310/309
- Bhargava, A., Carmona, F., Bhargava, M., y Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental management*, 105, 103-120. doi:doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.002
- Body, P. E., Dolan, P. R., y Malcahy, D. E. (1991). Environmental lead- A review. *Crit. Environ. Control*, 20, 299-310.
- Bradford, G. R., Page, A. L., Lund, L., y Olmstead, W. (1975). Trace Element Concentrations of Sewage Treatment Plant Effluents and Sludges; Their Interactions with Soils and Uptake by Plants. *Journal of Environmental Quality Abstract*, 4(1), 123-127. doi:10.2134/jeq1975.00472425000400010029x.

- Brooks, R. R. (1998). *Plants that hyperaccumulate metals : their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration, and phytomining*. New York: CAB international.
- Canadian Council of Ministers of the Environment CCME. (1999). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*.
- Cárdenas, L. (2011). *Efectos de los Factores Antrópicos sobre la Calidad Ambiental en la Ciudad de Huacho*. (Tesis doctoral), Universidad Nacional de Chiclayo, La Libertad, Trujillo. Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/5148/Tesis%20Doctorado%20-%20Luis%20Cardenas%20Salda%c3%b1a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chaney, R., Malik, M., Li , Y., Brown, S., Brewer, E., Angle, S., y Baker, A. (1997). Phytoremediation of Soil Metals. *Current opinion in Biotechnology*, 8, 279-284.
- Chávez, L. (2014). *Fitoremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo*. (Tesis de grado), Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2435/T01-C517-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- De la Cruz, J. J. (2018). *Acumulación de plomo en el cultivo de huacatay Tagetes minuta debido al manejo de fertilizantes en Carapongo - Chosica. 2018*. (Tesis de grado), Universidad César Vallejo, Lima, Perú. Recuperado de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/20518/DE%20LA%20CRUZ%20_AJJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Durán, P. (2010). *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, España. Recuperado de <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/36122>
- Flores, J. M. (2018). *Propuesta de simulación de remoción parcial de cromo en suelos contaminados utilizando como fitorremediador el Tagete sp Marigold*. (Tesis de grado), Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6484/QUflcojm.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gala, A. (25 de marzo de 2005) Descubriendo el ajo [Mensaje en un blog]. Recuperado de http://antoniogalahuerto.blogspot.com/2015_03_01_archive.html?view=classic

- Galán, E., y Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macia*, 10, 48-60. Recuperado de http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- García, I., y Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por metales pesados. *Tecnología de Suelos*. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Recuperado de: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>
- Garrido, M., Alleyne, S., Armas, T., Collazo, O., Jiménez, J., Castro, D., Alvarez, M., Rodríguez, A., y Gonzáles, R. (2013). Procedimiento analítico para la determinación de metales pesados en zanahoria y espinaca cultivadas en organopónicos urbanos. *Ciencias Técnicas agropecuaria*, 22(1). Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000100004
- Gonzáles, E., Tornero, M., Sandoval, E., Pérez, A., y Gordillo, A. (2011). Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 290-301. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000400002&lng=es&tlng=es.
- Gonzáles, M. I. (2016). *Mejoramiento de la fitoextracción en plantas nativas en suelos contaminados por actividades mineras en Puchuncaví y Quintero*. (Tesis doctoral) Universidad de Barcelona. Recuperado de <https://www.tdx.cat/handle/10803/404215#page=1>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5ta ed.). Editorial McGraw-Hill Interamericana. México D.F.
- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bullen*, 68 (1), 167-182. DOI:10.1093/bmb/ldg032
- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. (2000). *Trace elements un soils anda plants*. New York, U.S.A.: Third Edition.
- Knox, A., Gamedinger, A., Adriano, D., Kolka, R. y Kaplan, D. (1999). Sources and practices contributing to soil contamination. *Biorremediation of contaminated soils*. Recuperado de https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_knox001.pdf
- León, V. A. (2017). *Capacidad fitorremediadora de especies altoandinas para suelos contaminados por metales pesados procedentes de la compañía minera Lincuna SAC, en condiciones de invernadero 2015-2016*. (Tesis de grado) , Universidad

Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Ancash, Huaraz. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/10069/1/T-UCE-0004-82.pdf>

Macnair, M. (2002). Within and between population genetic variation for zinc accumulation in *Arabidopsis halleri*. *New Phytologist*, 155, 59-66.

Maroto, J. V. (2006). *Ajo*. Publicacionescajamar.es. Recuperado de: <https://www.publicacionescajamar.es/uploads/cultivos-hortícolas-al-aire-libre/08-cultivos-hortícolas-al-aire-libre.pdf>

Marseche, A. (2015). *Estudio físico y químico de suelos agrícolas para la estimación de salinización en el sector bajo de San Pedro de Lloc*. (Tesis de grado), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6442/MARCHESE_ADOLOFO_BRUNO_SUELOS_AGRICOLAS_SALINIZACION.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mas, A., y Azcue, J. (1993). *Metales en sistemas biológicos*. Barcelona, España: Promociones Y Publicaciones

Muñoz, M. J. (2016). *Extracción de metales por hidrometalurgia: Procesamiento de cobre y cinc*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Navarro, J., Aguilar, I., y López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10-25. Recuperado de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>

Ñañez, D. (2016). *Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú)*. (Tesis de grado), Universidad peruana Cayetano Heredia, Lima. Recuperado de http://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/upch/6445/Estudio_NanezAlcantara_Diana.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Olvera P., A., García Mateos, R., Vásquez Alarcón, A., Colinas León, T., Pérez Grajales, M., y Navarro Garza, H. (2008). Concentración de Pb, Cd, Ni y Zn en suelos contaminados y su transferencia a la pella de brócoli. *Terra Latinoamericana*, 26(3). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300003

Oriundo, C., y Robles, J. (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 Marcos, Lima. Recuperado de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/1636/Oriundo_gc.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ortiz, H., Trejo, R., Valdez, R., Arreola, J., 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. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2009000200009

Pérez, A., García, R., Vásquez, A., Colinas, T., Pérez, M., y Navarro, H. (2008). Concentración de Pb, Cd, Ni y Zn en suelos contaminados y su transferencia a la pella de brócoli. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 215-225. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300003

Pérez, J. y Merino, M. (2011). Definiciones de bulbos. *Definicion.de*. Recuperado de <https://definicion.de/bulbo-raquideo/>

Pila, C. Y. (2016). *Determinación de la presencia de plomo y cadmio en dos hortalizas lechuga (Lactuca sativa) y zanahoria (Daucus carota) en el Quineche*. (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Quito. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/10069/1/T-UCE-0004-82.pdf>

Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biolology*, 56, 15-39. Recuperado de <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>

Prieto, J., Gonzáles, C., Román, A., y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelo y agua. *Tropical and Subtropical Agrpecpsystems*, 10(1), 29-44. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Prieto, M. (2011). *Determinación de metales pesados en hortalizas distribuidas en plazas de mercado, centros de abasto e hipermercados de la ciudad de Bogotá D.C.* (Tesis de grado). Universidad para la Cooperación Internacional UCI, Costa Rica. Recuperado de: www.uci.ac.cr/Biblioteca/Tesis/PFGMIA99.pdf

Raskin, I. y Ensley, B. (2000). *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*. New York: John Wiley and Sons.

- Reeves, R. (2006). *Hyperaccumulation of trace elements by plants*. En *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils* Morel, J.L., Echevarria, G., y Goncharova, N. (pp.25-52). Nueva York: Springer. DOI: 10.1007/1-4020-4688-X_2
- Rigol , A., Sahuquillo, A., y Rauret, G. (2003). Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. *Trends in analytical chemistry*,22(3), 152-159. doi:10.1016/S0165-9936(03)00303-0
- Rodriguez, J. C., Valdez, R., Lara, J., Rodriguez, H., Vázquez, R., Magallanes, R., y García, J. (2006). Soil nitrogen fertilization effects on phytoextraction of cadmium and lead by tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Bioremediation Journal*, 10(3), 105-114. doi:10.1080/10889860600939815
- Stevens, D., Mclaughlin, M., y Heinrich, T. (2003). Determining toxicity of lead and zinc runoff in soils: Salinity effects on metal partitioning and on phytotoxicity. *Environmental toxicology and Chemistry*, 22(22), 3017.
- Tejada, C., Villabona, A., y Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34), 109-123. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992015000100010&script=sci_abstract&tlng=es
- Tena , K. (2013). *Contaminación por plomo en el cultivo de beterraga (*Veta vulgaris*) en dos sistemas de producción en Carapongo – Chosica*. (Tesis de grado). Universidad César vallejo, Lima, Perú.
- Volke, T., Velasco, J., y De la Rosa, D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. México, D.F.: S y G Editores S.A.
- Westerman, R. (1990). *Soil testing and plant analysis*. Estados Unidos de America, Madison: Soil Science Society of American.
- Williamson, A., y Johnson, M. (1982). *Mine Wastes Reclamation*. Inglaterra, Londres: Mining Journal Books Ltd.
- Wong, M. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*. 50 (6), 775-780 doi:10.1016/S0045-6535(02)00232-1

TERMINOLOGÍA

Bioacumulación: La bioacumulación significa un incremento en la concentración de un elemento químico en el interior de un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo. En los vegetales, la bioacumulación se entiende como el almacenamiento de contaminantes donde no todos tienen la misma afinidad de ser fitodisponibles (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

Bioadsorción: La bioadsorción es un proceso fisicoquímico que involucra generalmente a 2 acciones la adsorción y absorción de moléculas y iones. Este método poco convencional busca principalmente la remoción de metales pesados en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como sorbente diferentes materiales de origen biológico (Tejada *et al.*, 2015).

Bulbos: Terminología referida a la estructura biológica cuya forma se asemeja a una ampolla. La botánica lo muestra como una yema gruesa que suele localizarse en la porción subterránea de la planta y que presenta sustancias de (Pérez y Merino, 2011).

Contaminación: Es el desequilibrio que se presenta por la acumulación de sustancias nocivas y que pueden afectar a los organismos vivos (Knox *et al.*, 1999).

Fitotoxicidad: Esta referido al daño que causa una sustancia potencialmente tóxica al ingresar o ponerse en contacto con una planta. La forma visible que se expresa este daño es necrosis de tejidos afectados, muerte de órganos fotosintetizadores y finalmente una reducción considerable en su productividad (Alcoba, 2014).

Fitoextracción: Mecanismo por el cual, las plantas reducen la presencia de contaminantes del suelo, principalmente metales pesados. Este proceso es mediado por plantas acumuladoras, que van almacenar significativamente contaminantes en sus partes aéreas (Alcoba, 2014).

Lixiviación: Operación en la que tiene lugar el ataque químico, en fase acuosa, del metal valioso contenido en la mena mineral. Puede ser ácida, básica o neutra dependiendo del carácter del reactivo químico utilizado, que a su vez es función de la ganga del mineral (Muñoz, 2016).

Materia Orgánica: La materia orgánica como parámetro del suelo, presenta moléculas orgánicas resultantes de los organismos vivos y cuyas moléculas actúan como ligandos al

ceder electrones de algunas moléculas a cationes metálicos principalmente (Pilon-Smits, 2005).

Metal-Acumulación: Proceso en la que los iones metálicos son almacenados sin perjudicar a las plantas acumuladoras. Este proceso de acumulación se puede dar por varias formas, siendo la acomplejación el principal proceso físico de unión a metales. También se han observado un almacenamiento de iones metálicos por ciertas adaptaciones enzimáticas y por el ingreso en la membrana permeable (Baker, 1981).

Tolerancia: Esa la capacidad que presentan los organismos para sobrevivir en ambientes con una alta concentración de tóxicos y que puede dejar trascendencia a la progenie y manifestarse en su genotipo y en el ambiente con el que interactúa (Macnair, 2002).

APÉNDICES

Apéndice 1.

Guía para muestreo de suelos

Área de potencial interés (Ha)	Puntos de muestreo en total
0,1	4
0,5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

Fuente: MINAM, 2014, p. 24.

Apéndice 2.

Guía para la calidad de suelos según la Norma Canadá para los parámetros conductividad y pH

Criterios provisionales de remediación para suelos que aún no han sido reemplazados por las pautas canadienses de calidad de suelos.

SUMMARY TABLES

Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health

Update 7.0

Table. Interim remediation criteria for soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) that have not yet been replaced by Canadian Soil Quality Guidelines¹.

Parameter	Year released	Land use			
		Agricultural	Residential/ parkland	Commercial	Industrial
General Parameters					
Conductivity [dS/m]	1991	2	2	4	4
pH	1991	6 to 8	6 to 8	6 to 8	6 to 8
Sodium adsorption ratio	1991	5	5	12	12

Apéndice 3

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Suelo

ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA SUELO

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

Fuente: Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM

Apéndice 4.

Prueba de Tukey de la variación de plomo

Tabla 12

Prueba HSD Tukey^a de la variación de plomo en suelo

Puntos	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Punto 8	3	5.1000			
Punto 14	3	5.1667			
Punto 7	3	5.6000	5.6000		
Punto 11	3	5.9333	5.9333	5.9333	
Punto 3	3	6.3667	6.3667	6.3667	
Punto 13	3	7.2333	7.2333	7.2333	7.2333
Punto 15	3	7.6333	7.6333	7.6333	7.6333
Punto 2	3	7.6667	7.6667	7.6667	7.6667
Punto 5	3	7.7667	7.7667	7.7667	7.7667
Punto 6	3	7.7667	7.7667	7.7667	7.7667
Punto 1	3	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
Punto 4	3		8.7333	8.7333	8.7333
Punto 12	3		8.8333	8.8333	8.8333
Punto 10	3			9.2000	9.2000
Punto 9	3				9.8333
Sig.		0.169	0.081	0.075	0.303

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 5.

Diagramas de dispersión de las variables

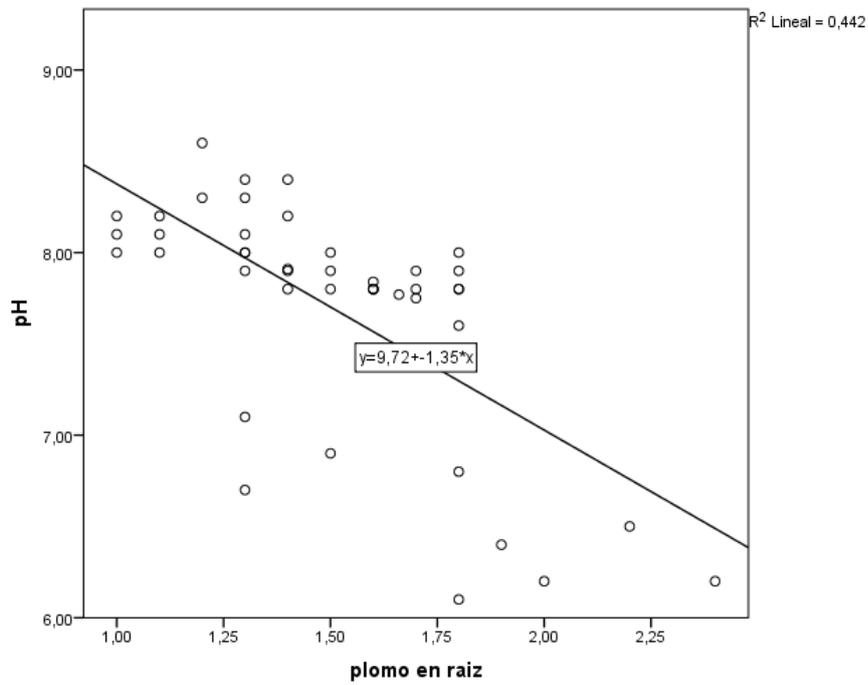


Figura 5. pH vs concentración de plomo en raíz (mg.kg⁻¹). (Cociente de correlación=-0.665)

Fuente: Elaboración propia.

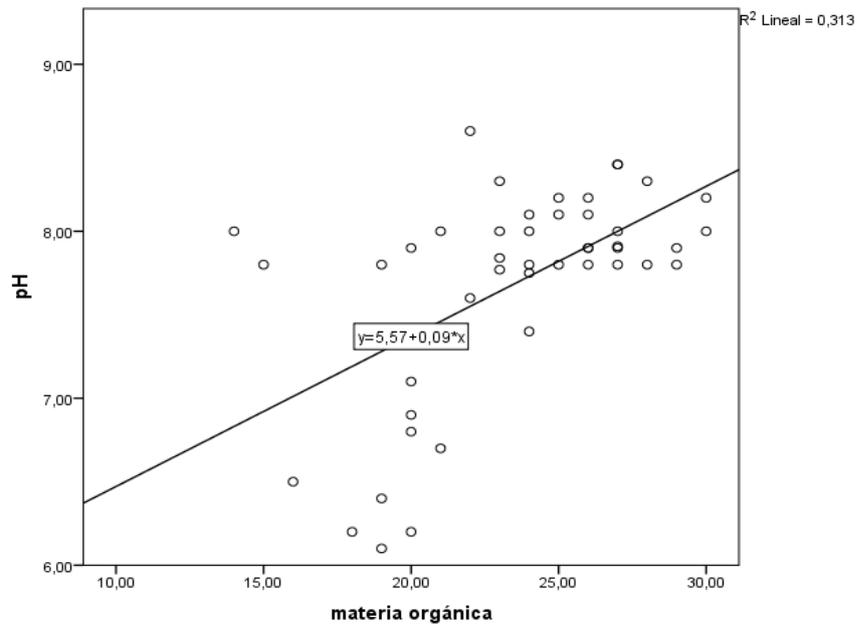


Figura 6. pH vs materia orgánica (%). (Cociente de correlación= 0.560). Fuente: Elaboración propia.

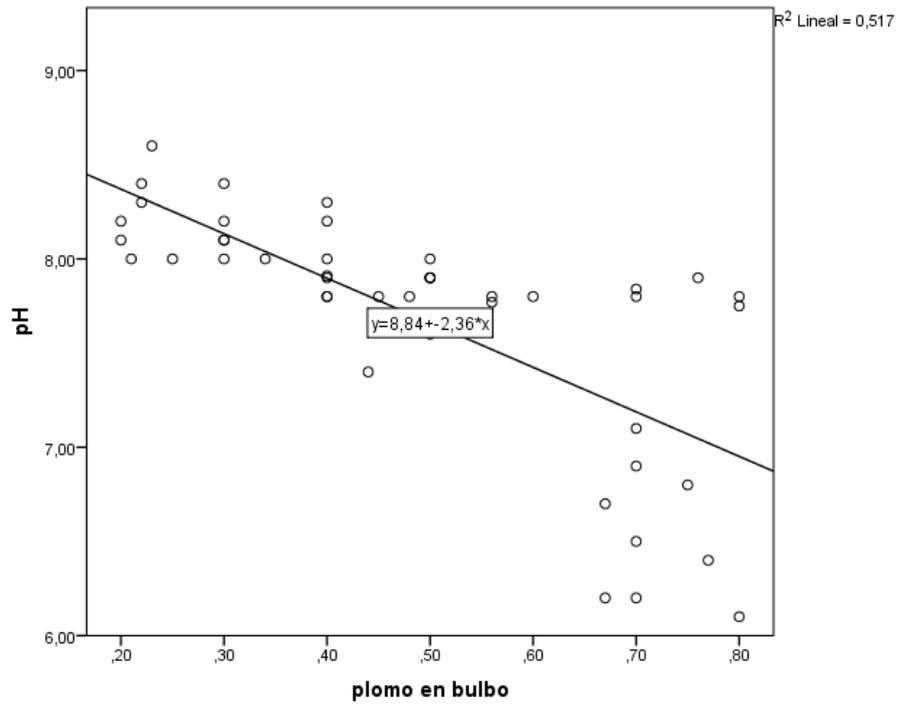


Figura 7. pH vs plomo en bulbo (mg.kg⁻¹). (Cociente de correlación= -0.719). Fuente: Elaboración propia.

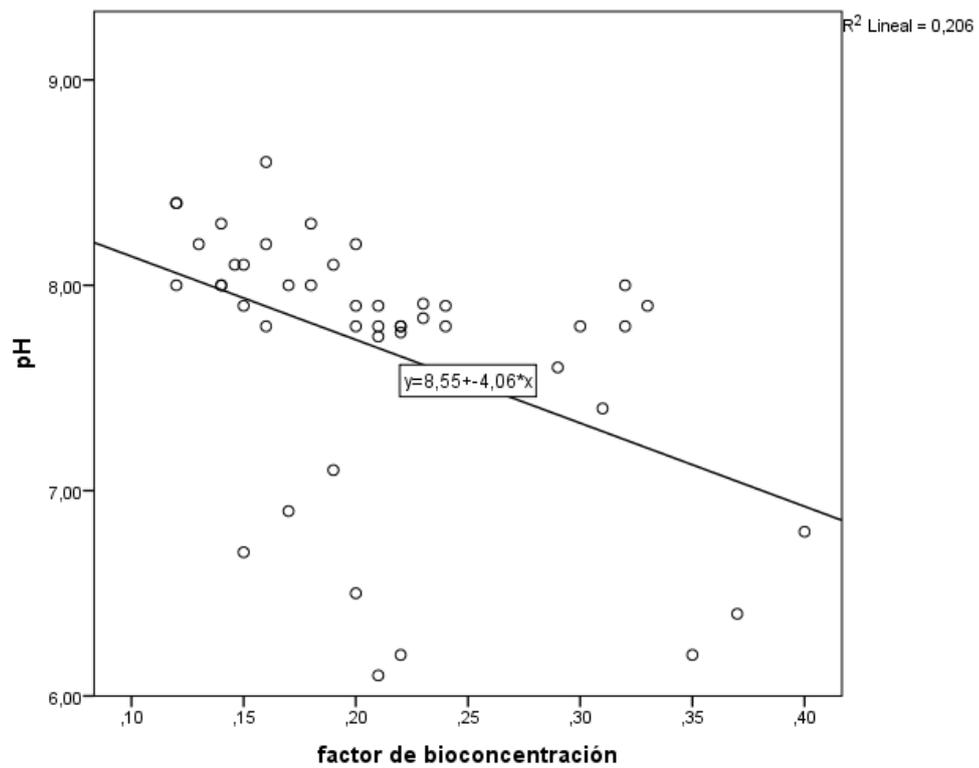


Figura 8. pH vs Factor de bioconcentración. (Cociente de correlación= -0.453). Fuente: Elaboración propia.

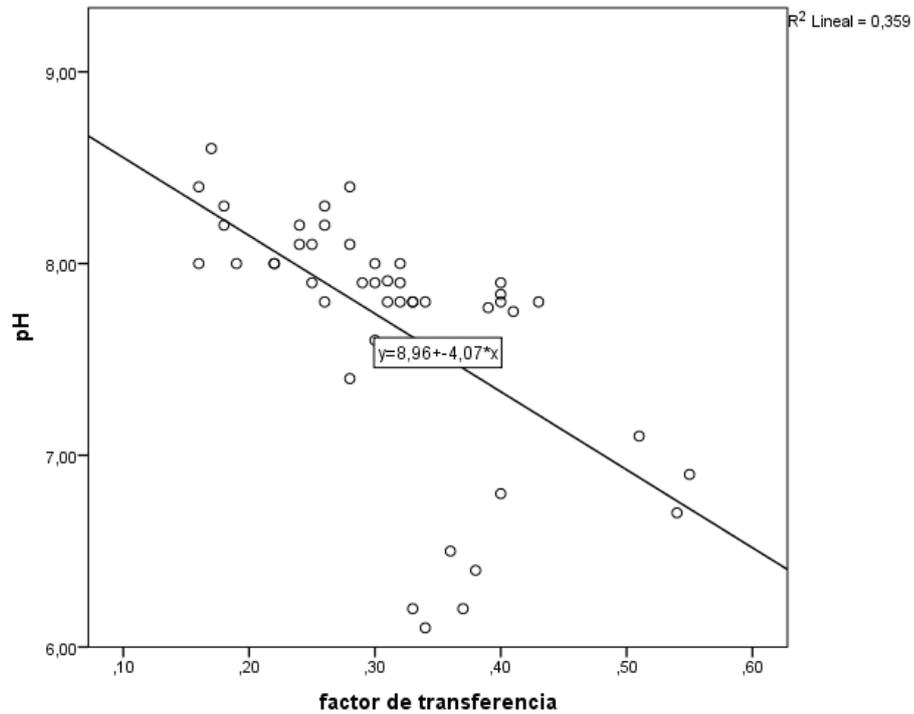


Figura 9. pH vs Factor de transferencia. (Cociente de correlación=-0.600). Fuente: Elaboración propia.

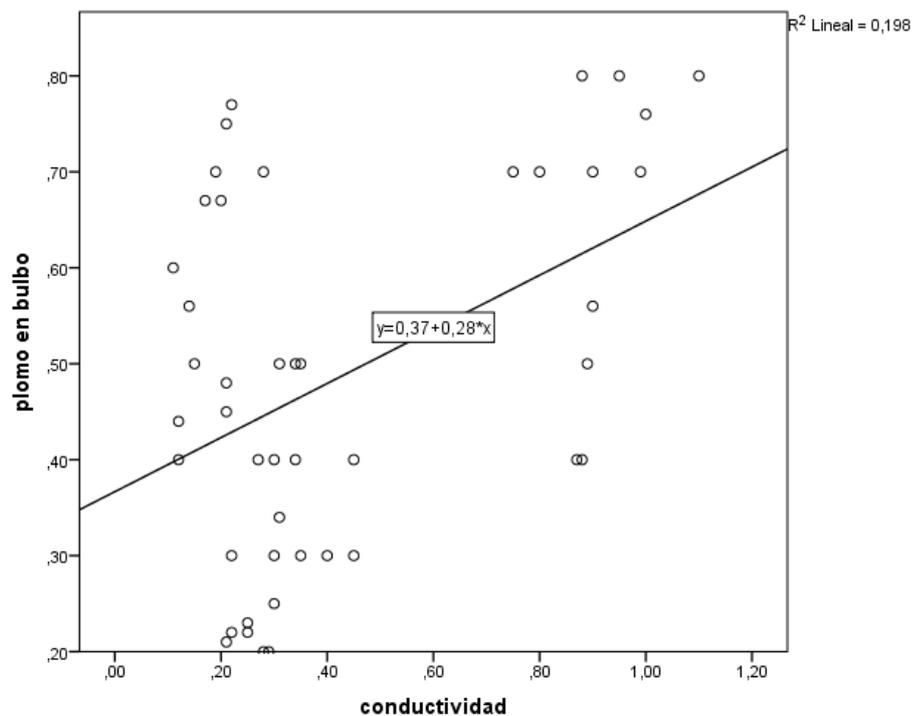


Figura 10. Plomo en bulbo (mg.kg^{-1}) vs Conductividad (mS.cm^{-1}). (Cociente de correlación=0.444). Fuente: Elaboración propia.

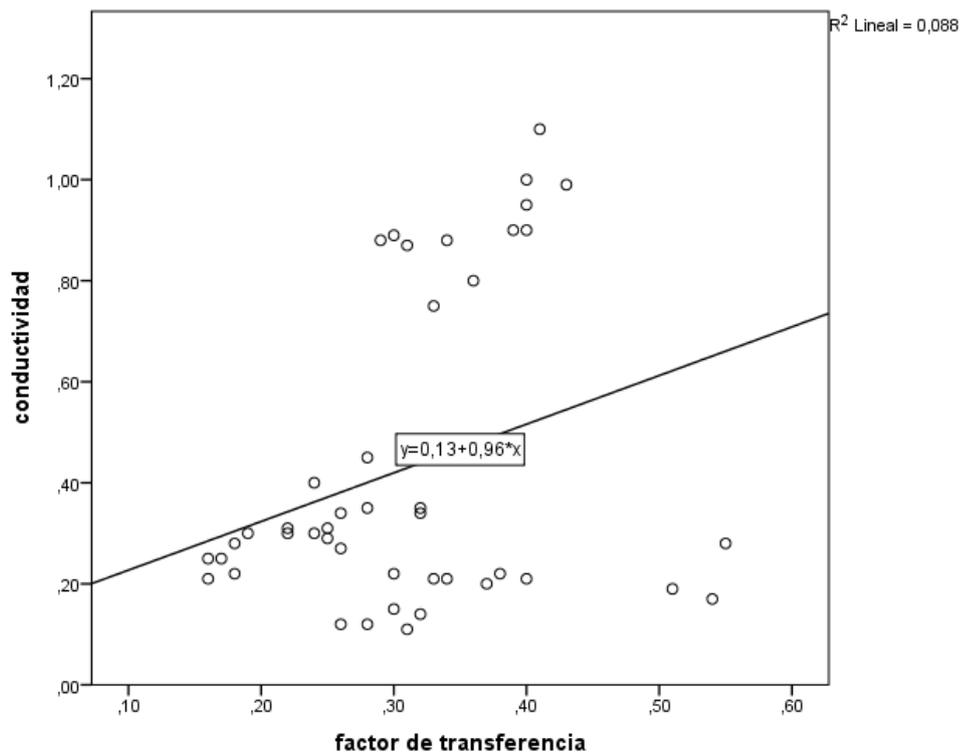


Figura 11. Factor de transferencia vs Conductividad ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$). (Cociente de correlación=0.296). Fuente: Elaboración propia.

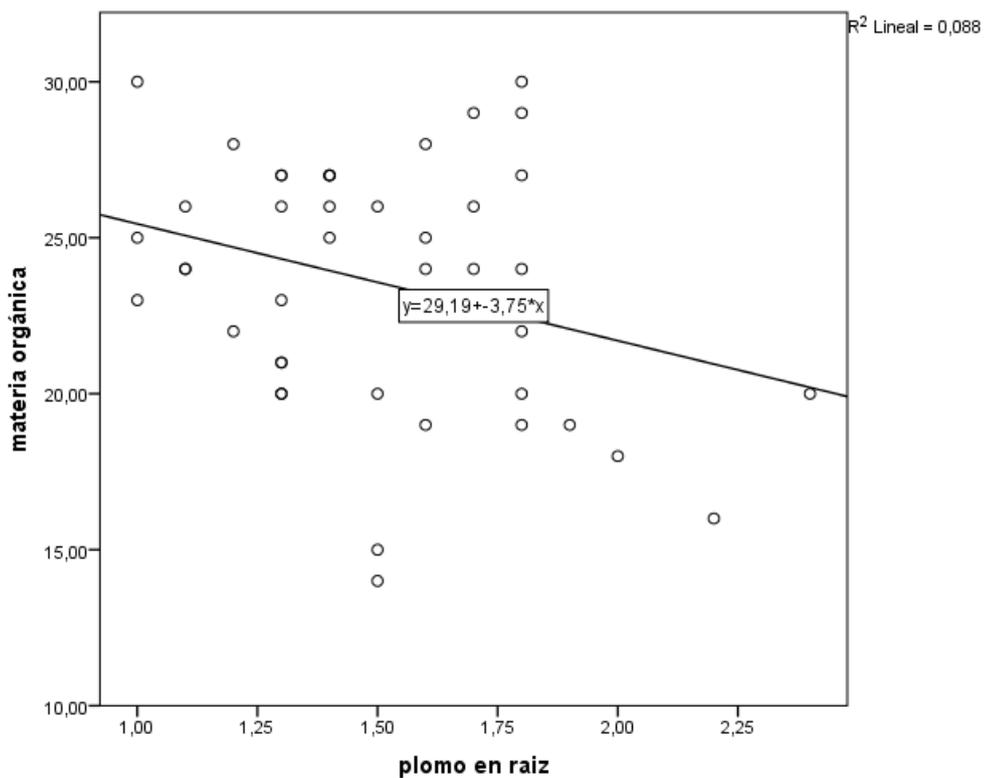


Figura 12. Materia orgánica (%) vs plomo en raíz ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). (Cociente de correlación=-0.297). Fuente: Elaboración propia.

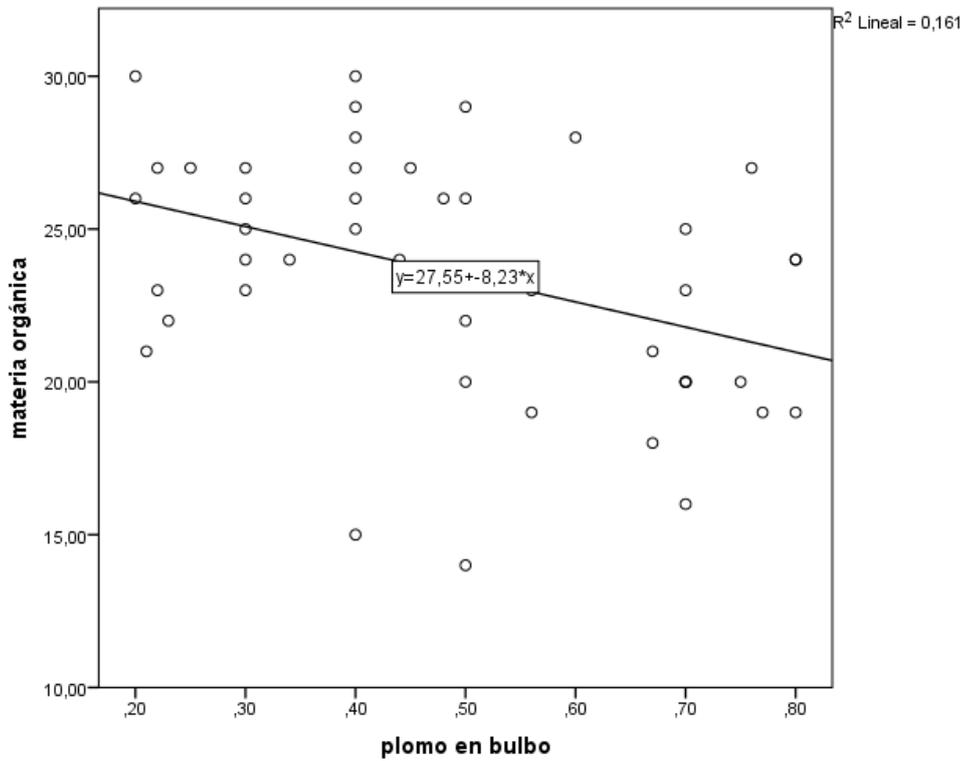


Figura 13. Materia orgánica (%) vs plomo en bulbo (mg.kg⁻¹). (Cociente de correlación=-0.402). Fuente: Elaboración propia.

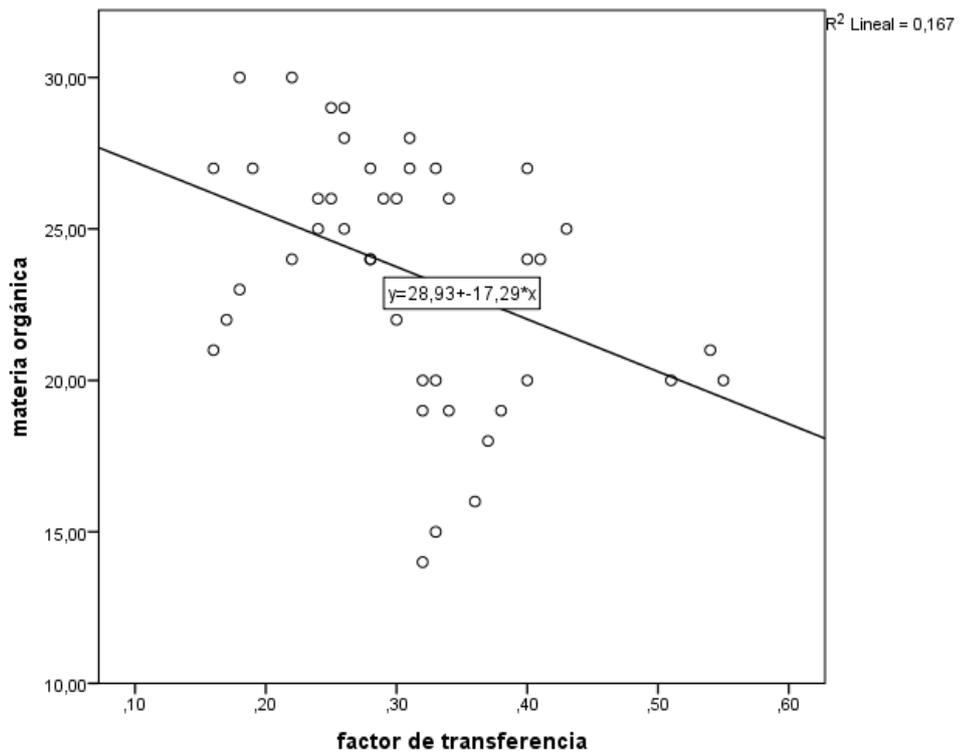


Figura 14. Materia orgánica (%) vs factor de transferencia. (Cociente de correlación=-0.409). Fuente: Elaboración propia.

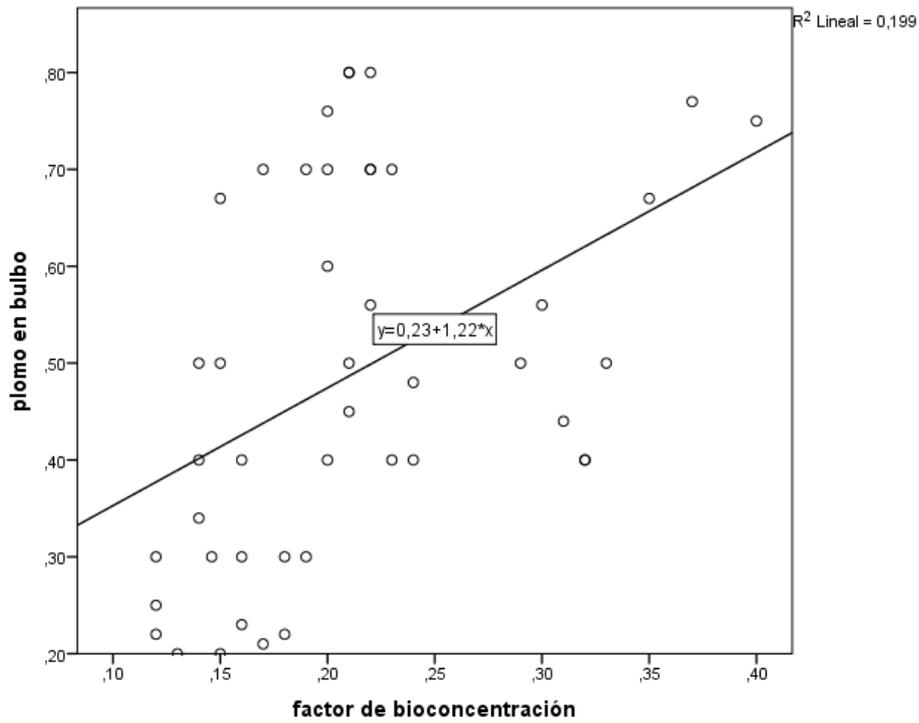


Figura 15. Factor de bioconcentración vs concentración de plomo en bulbo (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación= 0.447). Fuente: Elaboración propia.

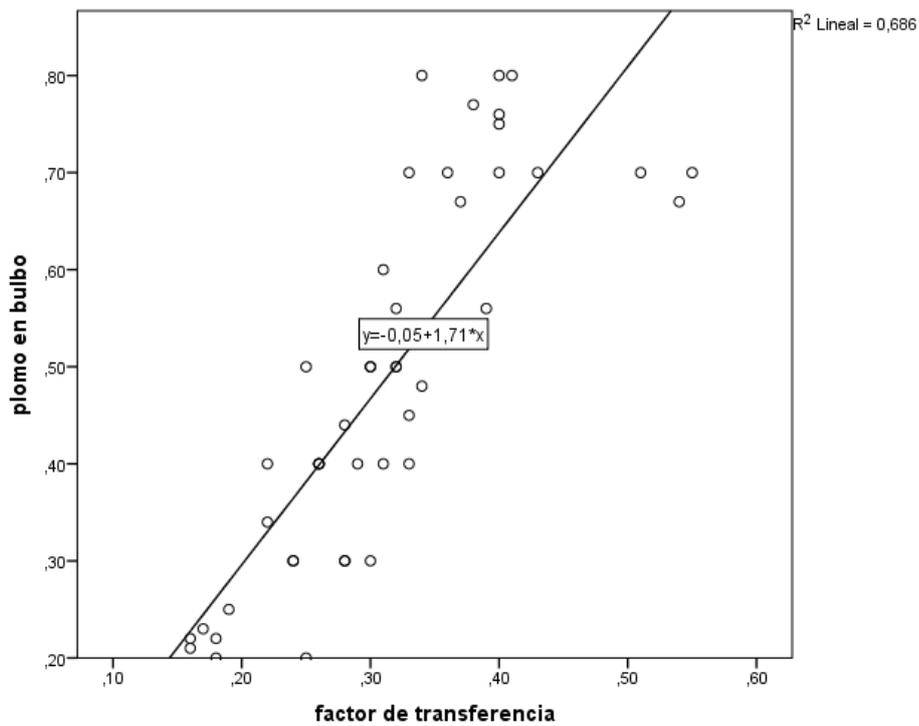


Figura 16. Factor de transferencia vs concentración de plomo en bulbo(mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación= 0.828). Fuente: Elaboración propia.

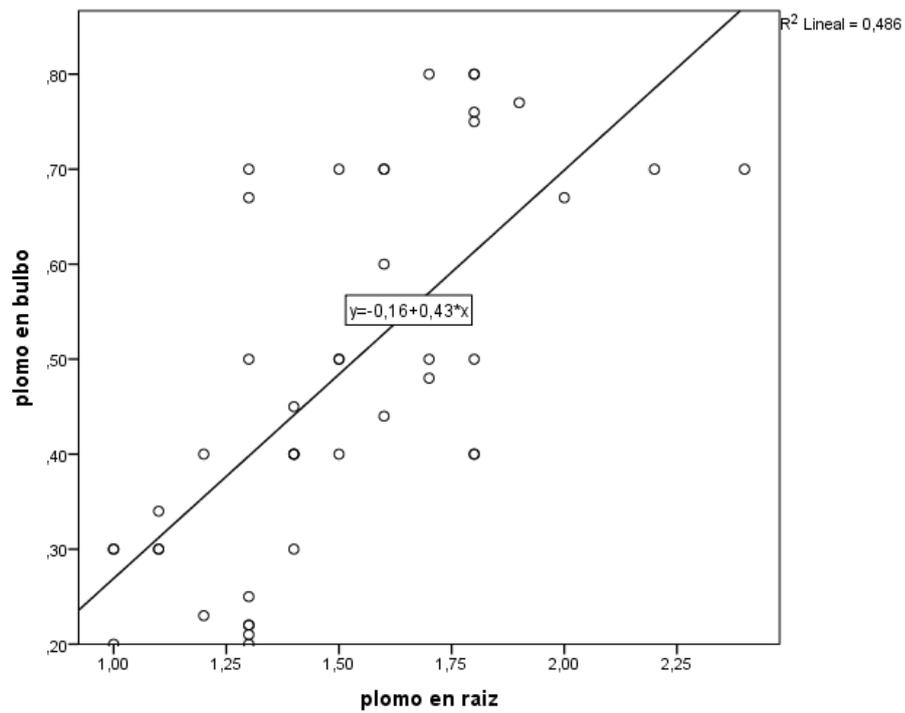


Figura 17. Concentración de plomo en raíz (mg.kg^{-1}) vs concentración de plomo en bulbo (mg.kg^{-1}). (Cociente de correlación= 0.697). Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 6.

Registro formato para la recolección de muestra.

Tabla 13

Formato para la recolección de muestra

FORMATO PARA RECOLECCION DE MUESTRA		
MUESTRA:		SUELO:
LOCALIDAD:		
NOMBRE DEL COLECTOR:		
PUNTO DE MUESTREO	COORDENADAS UTM	
	X	Y
P1		
P2		
P3		
P4		
P5		
P6		
P7		
P8		
P9		
P10		
P11		
P12		
P13		
P14		
P15		

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 7.

Registro fotográfico de la investigación



Figura 18. Recolección de las plantas de ajo de la localidad de Ruquia. *Fuente:* Elaboración propia.

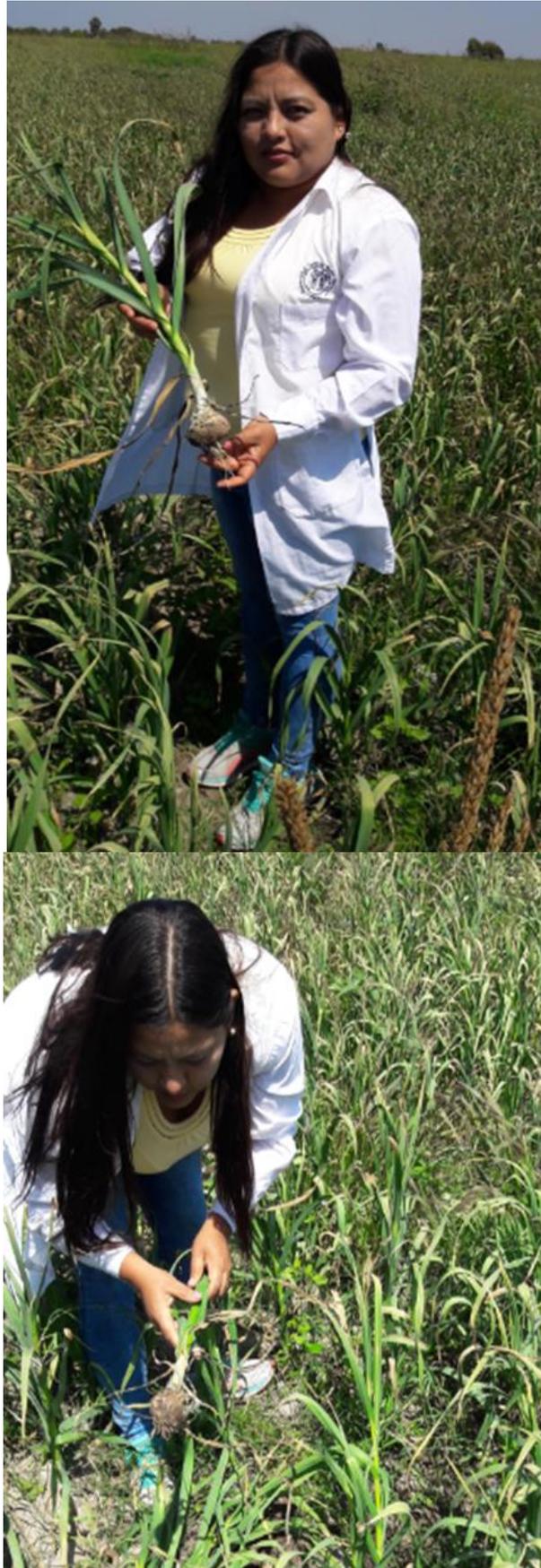


Figura 19. Recolección de las plantas de ajo de la localidad de Ruquía. *Fuente:* Elaboración propia.



Figura 20. Recolección de la muestra de suelo en la localidad de Ruquia - Huaura. *Fuente:* Elaboración propia.



Figura 21. Realización de las calicatas para la toma de muestra de suelo en la localidad de Ruquia – Huaura. *Fuente:* Elaboración propia.

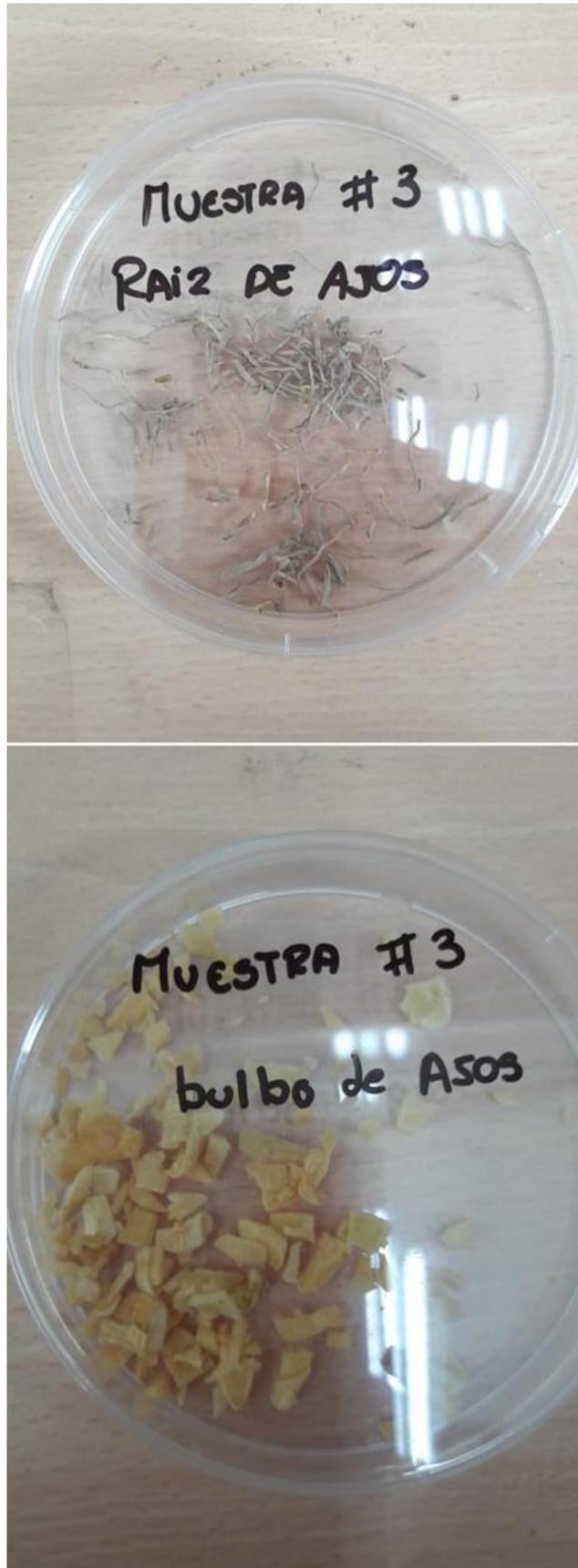


Figura 22. Procesamiento de las muestras vegetales en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Digestión de las muestras para posterior análisis. Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Preparación y lectura de las muestras con el fotómetro. Fuente: Elaboración propia.