

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Evaluación del contenido de metales pesados con relación a las
propiedades edáficas en suelos adyacentes a la Mina “Antamina”,
San Marcos-Ancash

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

Yover Luciano Juarez Valverde

ASESOR

Honorio Eloy Munive Jáuregui

HUAURA, PERÚ

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 020 - 2020/UCSS/FIA/DI

Siendo las 15:30 horas del día 10 de setiembre de 2020 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. Roger Manuel Mestas Valero | presidente |
| 2. Wilfredo Mendoza Caballero | primer miembro |
| 3. Mario Antonio Anaya Raymundo | segundo miembro |
| 4. Honorio Eloy Munive Jáuregui | asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada: **EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES PESADOS CON RELACIÓN A LAS PROPIEDADES EDÁFICAS EN SUELOS ADYACENTES A LA MINA "ANTAMINA", SAN MARCOS-ANCASH**, que presenta el bachiller en Ciencias Ambientales, **Yover Luciano Juárez Valverde** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

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

APROBAR

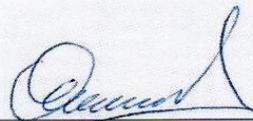
DESAPROBAR

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

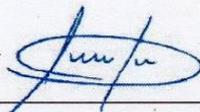
Lima, 10 de setiembre de 2020.



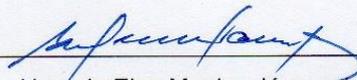
Roger Manuel Mestas Valero
PRESIDENTE



Wilfredo Mendoza Caballero
1^{er} MIEMBRO



Mario Antonio Anaya Raymundo
2° MIEMBRO



Honorio Eloy Munive Jáuregui
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser la fuente de mi inspiración y concederme la fortaleza necesaria en el camino para lograr el anhelo de tener una profesión.

A mis padres David y Aidee, quienes con tanto amor, trabajo y sacrificio me brindaron el apoyo constante. Gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que ahora soy. Es un orgullo y privilegio ser hijo de tan abnegados y ejemplares padres.

A mis hermanos Yohan y Flor, quienes estuvieron siempre acompañándome y ofreciéndome el soporte moral durante la etapa de mi vida universitaria.

AGRADECIMIENTOS

- Al divino Hacedor nuestro Dios por bendecirme y guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en esta etapa de la culminación de mi profesión y permitirme continuar a pesar de aquellos momentos de dificultad y debilidad.
- A mis padres, David y Aidee por darme la vida e inculcarme buenos principios y valores éticos, ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas y por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria.
- A mi asesor de tesis Dr. Honorio Eloy Munive Jáuregui, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de tesis y ser el factor principal y fundamental en el desarrollo de la presente investigación, quien con constancia y profesionalismo supo estimular, orientar y brindarme su valiosa experiencia y dedicación.
- A mis hermanos Yohan David y Flor Yovana por sus palabras de aliento que me permitían sentirme orgulloso de lo que estaba persiguiendo y que podría lograrlo. Espero convertirme en algo que les impulse a seguir avanzando en el camino que ellos se han trazado.
- Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo [PRONABEC] de la modalidad de Beca 18, por permitirme desarrollar mi talento universitario y estimularme en mi formación profesional, brindándome oportunidades incomparables durante estos cinco años académicos estudiando en una universidad de prestigio y buenos valores.
- A la Facultad de Ingeniería Agraria, Programa de estudios de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica Sedes Sapientiae [UCSS] y a todos los docentes, cuyas enseñanzas me permitieron concluir mis estudios profesionales. Gracias por ser guía y ejemplo en las diferentes etapas de esta investigación.
- Al profesor Blgo. Armando Chiclla Salazar que con sabiduría y conocimiento científico apoyó de manera incondicional en la etapa de laboratorio para la obtención de los resultados de esta investigación.
- A todos mis amigos, compañeros y futuros colegas, con quienes compartí dentro y fuera de las aulas, brindándome el apoyo desinteresado, gracias infinitas a ellos por la ayuda y buena voluntad.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice general	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	xi
Índice de apéndices.....	xiii
Resumen	xiv
Abstract.....	xv
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Bases teóricas especializadas	12
1.2.1. El recurso suelo.....	12
1.2.2. Suelo agrícola	13
1.2.3. Suelo contaminado.....	14
1.2.4. Movimiento de los metales pesados	14
1.2.5. Minería.....	15
1.2.6. Explotación minera	16
1.2.7. Minería y medio ambiente	16
1.2.8. Metales pesados	17
1.2.9. Contaminantes con alta toxicidad	18
1.2.10. Propiedades del suelo y metales pesados.....	21
1.2.11. Factores que afectan a la disponibilidad de los metales pesados.....	22
1.2.12. Peligrosidad de los metales pesados	26
1.2.13. Efecto de metales pesados sobre las plantas	28
1.2.14. Disponibilidad de los metales pesados en el suelo	29

1.2.15. Efectos directos de los metales pesados en los suelos.....	29
1.2.16. Los metales pesados y su comportamiento en el suelo-planta	30
1.2.17. Exposición de los metales pesados y su efecto en la salud y el ambiente	31
1.2.18. Biorremediación	32
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.1. Diseño de la investigación	36
2.1.1. Lugar y fecha	36
2.1.2. Población y muestra.....	37
2.1.3. Técnicas instrumentales.....	38
2.1.4. Descripción del experimento	38
2.1.5. Identificación de las variables y su mensuración (metodología).....	41
2.1.6. Análisis estadístico de las propiedades del suelo y el contenido de metales pesados	42
2.1.7. Materiales	42
CAPÍTULO III: RESULTADOS	44
3.1. Resultados del análisis de los suelos de Antamina	44
3.1.1. Resultados de la caracterización de los suelos en estudio se presentan en las siguientes tablas:.....	44
3.2. Resultados del análisis de los elementos pesados de los suelos en estudio.....	49
3.3. Resultados de los análisis de los elementos pesados y las propiedades del suelo.....	52
3.3.1. Resultados del contenido de metales pesados en relación con el pH de los suelos	52
3.3.2. Resultados del contenido de metales pesados en relación con la materia orgánica	60
3.3.3. Resultados del contenido de los micronutrientes en relación CIC	67
3.3.4. Resultados del contenido de metales pesados y el contenido de arcilla.....	74
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	82
4.1. Caracterización de los suelos en estudio.....	82

4.1.1.	Reacción y conductividad de los suelos	82
4.1.2.	Clases texturales	82
4.1.3.	Materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico.....	83
4.2.	Contenido de metales pesados: cadmio, cromo y plomo.....	83
4.3.	Regresiones y correlaciones entre el contenido del metal pesado y las propiedades del suelo	84
4.3.1.	Contenido de metal pesado con relación al pH	84
4.3.2.	Contenido de metal pesado con relación a la materia orgánica.....	86
4.3.3.	Contenido de metal pesado con relación a la CIC.....	89
4.3.4.	Contenido de metal pesado con relación al contenido de arcilla.....	91
4.4.	Diagrama de caja y prueba de t	93
4.4.1.	Contenido de plomo	93
4.4.2.	Contenido de cadmio	93
4.4.3.	Contenido de cromo	94
4.4.4.	pH	94
4.4.5.	Materia orgánica.....	95
4.4.6.	Capacidad de intercambio catiónico.....	95
4.4.7.	Contenido de arcilla.....	95
CAPITULO V: CONCLUSIONES		96
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES		99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		100
TERMINOLOGÍA		109
APÉNDICES		112

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Efecto de metales pesados en las plantas</i>	28
Tabla 2. <i>Tipos de biorremediación</i>	34
Tabla 3. <i>Puntos de muestreos</i>	39
Tabla 4. <i>Estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas, suelos de parques y suelos industriales</i>	41
Tabla 5. <i>VARIABLES EN ESTUDIO</i>	41
Tabla 6. <i>pH y conductividad eléctrica</i>	44
Tabla 7. <i>Textura y clase textural</i>	46
Tabla 8. <i>Materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico</i>	48
Tabla 9. <i>Contenido de elementos menores</i>	50
Tabla 10. <i>Estadísticos del contenido de Pb y valores de pH a las profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm</i>	53
Tabla 11. <i>Análisis de regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad 0-20 cm</i>	53
Tabla 12. <i>Análisis de regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad 20-60 cm</i>	54
Tabla 13. <i>Estadísticos del contenido de Cd y el pH a dos profundidades de suelo: 0- 20 cm y 20-60 cm</i>	55
Tabla 14. <i>Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cadmio en la profundidad 0-20 cm</i>	56
Tabla 15. <i>Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cadmio en la profundidad 20-60 cm</i>	57
Tabla 16. <i>Estadísticos del contenido de Cr y el pH a dos profundidades de suelo: 0- 20 cm y 20-60 cm</i>	58
Tabla 17. <i>Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cromo en la profundidad 0-20 cm</i>	58
Tabla 18. <i>Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cromo en la profundidad 20-60 cm</i>	59
Tabla 19. <i>Estadísticos del contenido de Pb y de MO a dos profundidades de suelo: 0- 20 y 20-60 cm</i>	60

Tabla 20. <i>Análisis de regresión entre los contenidos de MO y de plomo en la profundidad 0-20 cm</i>	61
Tabla 21. <i>Análisis de regresión entre contenidos de MO y de plomo en la profundidad 20-60 cm</i>	62
Tabla 22. <i>Estadísticos de los contenidos de Cd y de MO a dos profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm</i>	62
Tabla 23. <i>Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cadmio en la profundidad 0-20 cm</i>	63
Tabla 24. <i>Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cadmio en la profundidad 20-60 cm</i>	64
Tabla 25. <i>Estadísticos del contenido de Cr y de MO a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm</i>	65
Tabla 26. <i>Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cromo en la profundidad 0-20 cm</i>	65
Tabla 27. <i>Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cromo en la profundidad 20-60 cm</i>	66
Tabla 28. <i>Estadísticos del contenido de Pb y de CIC a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm</i>	67
Tabla 29. <i>Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de plomo en la profundidad 0-20 cm</i>	68
Tabla 30. <i>Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de plomo en la profundidad 20-60 cm</i>	69
Tabla 31. <i>Estadísticos del contenido de Cd y CIC a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm</i>	70
Tabla 32. <i>Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cadmio en la profundidad 0-20 cm</i>	70
Tabla 33. <i>Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cadmio en la profundidad 20-60 cm</i>	71
Tabla 34. <i>Estadísticos del contenido de Cr y valores de CIC a dos profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm</i>	72
Tabla 35. <i>Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cromo en la profundidad 0-20 cm</i>	73
Tabla 36. <i>Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cromo en la profundidad 20-60 cm</i>	74

Tabla 37. Estadísticos de los contenidos de Pb y de arcilla a dos profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm.....	75
Tabla 38. Análisis de regresión entre los contenidos de arcilla y de plomo en la profundidad 0-20 cm	75
Tabla 39. Análisis de regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad 20-60 cm	76
Tabla 40. Estadísticos del contenido de Cd y de arcilla a dos profundidades 0-20 cm y 20-60 cm	77
Tabla 41. Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad 0-20 cm	78
Tabla 42. Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad 20-60 cm	79
Tabla 43. Estadísticos de los contenidos de Cr y de arcilla a dos profundidades: 0-20 y 20-60 cm	79
Tabla 44. Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cromo en la profundidad 0-20 cm	80
Tabla 45. Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cromo en la profundidad 20-60 cm	81

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Desplazamiento e interacciones de los contaminantes en el suelo en el sistema planta animal-hombre.	15
<i>Figura 2.</i> Esquema de procesos mineros con los posibles impactos ambientales.....	17
<i>Figura 3.</i> Movimiento de los metales pesados dentro del sistema suelo-planta.	30
<i>Figura 4.</i> Contaminación por metales pesados en el aire, suelo, agua y planta.	32
<i>Figura 5.</i> Tipos de fitorremediación.	34
<i>Figura 6.</i> Diagrama de caja, para el pH del suelo a dos profundidades.....	45
<i>Figura 7.</i> Diagrama de caja para el contenido de arcilla (%) del suelo a dos profundidades.	47
<i>Figura 8.</i> Diagrama de caja para el contenido de MO en el suelo a dos profundidades. ...	48
<i>Figura 9.</i> Diagrama de caja para la CIC en el suelo a dos profundidades.	49
<i>Figura 10.</i> Diagrama de caja para el contenido de Pb en el suelo a dos profundidades.	51
<i>Figura 11.</i> Diagrama de caja para el contenido de Cd en el suelo a dos profundidades.....	51
<i>Figura 12.</i> Diagrama de caja, para el contenido de Cr en el suelo a dos profundidades.	52
<i>Figura 13.</i> Regresión y correlación del pH y contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm.	54
<i>Figura 14.</i> Regresión y correlación del pH y contenido de plomo en las profundidades 20-60 cm.	55
<i>Figura 15.</i> Regresión y correlación del pH y contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm.	56
<i>Figura 16.</i> Regresión y correlación del pH y contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm.	57
<i>Figura 17.</i> Regresión y correlación del pH y contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm.	59
<i>Figura 18.</i> Regresión y correlación del pH y contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm.	60
<i>Figura 19.</i> Regresión y correlación de la MO y contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm.	61
<i>Figura 20.</i> Regresión y correlación de MO y contenido de plomo en la profundidad de 20-60 cm.	62

<i>Figura 21.</i> Regresión y correlación de la MO y contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm.	63
<i>Figura 22.</i> Regresión y correlación de la MO y contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm.	64
<i>Figura 23.</i> Regresión y correlación de la MO y contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm.	66
<i>Figura 24.</i> Regresión y correlación de la MO y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm.	67
<i>Figura 25.</i> Regresión y correlación de la CIC del suelo y el contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm.	68
<i>Figura 26.</i> Regresión y correlación de la CIC del suelo y el contenido de Plomo en la profundidad de 20-60 cm.	69
<i>Figura 27.</i> Regresión y correlación de la CIC y el contenido de Cadmio en la profundidad de 0-20 cm.	71
<i>Figura 28.</i> Regresión y correlación de la CIC y contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm.	72
<i>Figura 29.</i> Regresión y correlación de la CIC del suelo y el contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm.	73
<i>Figura 30.</i> Regresión y correlación de la CIC y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm.	74
<i>Figura 31.</i> Regresión y correlación entre el contenido de arcilla y de plomo del suelo en la profundidad de 0-20 cm.	76
<i>Figura 32.</i> Regresión y correlación entre el contenido de arcilla y de plomo del suelo en la profundidad de 20-60 cm.	77
<i>Figura 33.</i> Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad de 0-20 cm.	78
<i>Figura 34.</i> Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad de 20-60 cm.	79
<i>Figura 35.</i> Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cromo en la profundidad de 0-20 cm.	80
<i>Figura 36.</i> Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cromo en la profundidad de 20-60 cm.	81

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Mapa de ubicación del área en estudio.....	112
Apéndice 2. Mapa de los puntos de muestreo	113
Apéndice 3. Tablas para la interpretación de los resultados del análisis de suelos	114
Apéndice 4. Estándares de Calidad Ambiental (ECAs)	116
Apéndice 5. Fotografías del proceso de investigación	117

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en los suelos agrícolas contaminados con relaves mineros adyacentes a la Mina Antamina, en el caserío de Contonga, distrito de San Marcos, de la región Ancash. El objetivo principal fue conocer los niveles de la acumulación de los metales pesados plomo, cadmio, cromo, estudiados en dos profundidades del perfil del suelo (0-20 y 20-60 cm), complementado con la relación de los niveles de estos metales pesados con el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de arcilla, en ocho puntos de muestreo. Los resultados obtenidos mediante este estudio determinaron que los tres metales pesados estudiados como el plomo tuvo resultados muy variables que van desde 56,0 a 129,0 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, del mismo modo el cadmio está en niveles muy altos desde 7,90 hasta 19,90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el cromo desde 14,5 a 27,0 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ los cuales sobrepasaron los valores de los estándares de calidad ambiental (ECAs) permisibles para suelos agrícolas, establecidos por el Ministerio del Ambiente [MINAN] (2017), que en este caso es de 70 mg de $\text{Pb}\cdot\text{kg}^{-1}$, 1,4 mg de $\text{Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ y 0,4 mg de $\text{Cr}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente. La interacción de los metales pesados con las propiedades del suelo fue comparada estadísticamente mediante regresiones y correlaciones lineales. El análisis de la regresión y de la correlación entre los metales estudiados con las propiedades del suelo demostró que solamente el pH, tiene un efecto significativo en los niveles de plomo y en menor riesgo los niveles de Cd y Cr presentes en los suelos en estudio. Por lo tanto, se debe tener en cuenta estos niveles de contaminación para evitar que los elementos Pb, Cd y Cr puedan ser absorbidos por los cultivos y luego ingeridos por los comuneros quienes labran estas tierras de cultivo para producir alimentos para el autoconsumo, por lo que se recomienda el tratamiento de estos suelos mediante actividades de fitorremediación, complementándose con un programa de reforestación.

Palabras claves: Metales pesados, niveles de toxicidad, análisis de la regresión, disponibilidad de nutrientes, límites permisibles.

ABSTRACT

This research work was carried out on agricultural soils contaminated with mining tailings adjacent to the Antamina Mine, in the Contonga town, San Marcos district, in the Ancash region, with the main objective of knowing the levels of accumulation of heavy metals lead, cadmium, chromium, studied at two depths of the soil profile (0-20 and 20-60 cm), complemented by the relationship of these levels of these heavy metals with pH, organic matter content, capacity cation exchange and clay content, at eight sampling points. The results obtained through this study determined that the three heavy metals studied such as lead had highly variable results ranging from 56,0 to 129,0 cmol (+). kg^{-1} , in the same way cadmium is at extremely high levels from 7,90 to 19.90 mg.kg^{-1} and chromium from 14,5 to 27,0 cmol (+). kg^{-1} which exceeded the values of the environmental quality standards (ECAs) permissible for agricultural soils, established by the Ministry of the Environment [MINAN] (2017), which in this case is 70 mg of Pb.kg^{-1} , 1.4 mg of Cd.kg^{-1} and 0.4 mg of Cr.kg^{-1} , respectively. The interaction of heavy metals with soil properties was statistically compared using linear correlation regressions. The regression analysis and the correlation between the metals studied with the properties of the soil showed that only pH has a significant effect on lead levels and Cd and Cr levels present in the studied soils are less risky. Therefore, these levels of contamination must be taken into account to avoid that the elements Pb, Cd and Cr can be absorbed by the crops and then ingested by the community members who till these farmlands to produce food for self-consumption, therefore that the treatment of these soils through phytoremediation activities is recommended, complemented by a reforestation program.

Keywords: Heavy metals, toxicity levels, regression analysis, nutrient availability, permissible limits.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las actividades mineras son consideradas como una de las principales fuentes de deterioro de la calidad de los recursos naturales por los impactos negativos generados al ambiente (Stankovic y Stankovic, 2013). Los lugares destinados a la explotación minera son las principales fuentes de contaminación del medio ambiente porque son los centros de dispersión de los minerales pesados que de manera natural se convierten en los puntos distribución de los elementos traza hacia el medio ambiente mediante la fuerza del aire y del agua y del material que se acumula en el suelo. La contaminación del suelo por los metales pesados es la responsable de los efectos negativos que afectan a la salud del ser humano y de otros seres vivientes, motivando que los países afectados estandaricen las cantidades máximas permisibles de estos elementos pesados en el suelo, teniendo en cuenta las condiciones edafológicas y dentro de ellas las características propias, tales como la salinidad y el pH, porcentajes de materia orgánica y arcilla (Arce y Calderón, 2017). La duración de la contaminación por metales pesados en los suelos puede variar de cientos a miles de años, dependiendo del tipo de suelo y de sus parámetros físicos - químicos (Puga *et al.*, 2006). La adición de los metales pesados que ingresan al suelo es en cantidades pequeñas y se ubican en lugares especiales con capacidad de adsorción y son fuertemente retenidos por los coloides del suelo, como la arcilla y el humus (orgánicos e inorgánicos) (Cartaya *et al.*, 2010). Los suelos arenosos contienen menores concentraciones de metales pesados que los suelos arcillosos (La Rosa *et al.*, 2007).

El suelo es la capa superficial del terreno donde se asienta la vida para todo organismo sobre la Tierra. También es la base de la agricultura que en estos tiempos es alterado por las actividades mineras debido a que contiene todo tipo de material residual, y afecta negativamente a la biota y su calidad. La contaminación del suelo por metales pesados se debe básicamente a la explotación y fundición de metales en la actividad minera procedentes de una inadecuada disposición del lodo y los sedimentos residuales. Entre estos elementos se registran al cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As) y selenio (Se). Las altas concentraciones de estos elementos impactan negativamente sobre los cultivos y la calidad de los alimentos que se desarrollan en las inmediaciones de las actividades de extracción minera, dañando a la vez al medio ambiente y a la salud humana, debido a que los elementos citados pueden ser trasladados o removidos a la cadena

alimenticia, mediante el consumo de plantas y animales contaminados (Lora y Bonilla, 2010).

El problema grave que radica en la minería es la generación de sustancias elevadamente tóxicas y peligrosas, como ácido sulfúrico y metales pesados. Estas sustancias, también conocidas como pasivos ambientales, las mismas que se trasladan al ambiente, desde donde afectan a las plantas cultivadas y a los animales que son destinadas a la alimentación, llegando a trasladarse hasta los consumidores que viven alrededor de la zona de influencia de la actividad minera (Arce y Calderón, 2017). Al ser el suelo muy frágil, de difícil y prologado proceso de recuperación y de extensión muy limitada, conlleva a que un deficiente uso será la causa de una degradación de este recurso que no es posible renovar en períodos cortos de tiempo (González, 2005). Por estas razones, esta investigación permitirá conocer las concentraciones de los metales pesados en los suelos agrícolas adyacentes de la empresa minera Antamina, de tal forma que los resultados obtenidos serán beneficiosos para la población adyacente ya que son quienes realizan sus actividades agrícolas y pecuaria para evitar riesgos a futuro.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el contenido de metales pesados con relación a las propiedades edáficas en suelos adyacentes a la mina “Antamina”, San Marcos-Ancash.

Objetivos específicos

- Evaluar las características físico - químicas de los suelos afectados por la contaminación con metales pesados en los suelos agrícolas adyacentes a la mina “Antamina” en el distrito de San Marcos, Huari – Ancash.
- Determinar el contenido de metales pesados mayoritarios que están afectando a los suelos agrícolas adyacentes a la empresa minera “Antamina” en el distrito de San Marcos, Huari – Ancash.
- Conocer los niveles de contaminación por metales pesados y la relación con la profundidad, el pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y contenido de arcillas en los suelos agrícolas adyacentes a la mina “Antamina”

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Internacionales

Martínez *et al.* (2017) investigaron el tema de “Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Colombia. El contexto en el que fue desarrollada la investigación muestra que la degradación de los recursos naturales surgió como consecuencia de la explotación minera informal de oro. El principal objetivo de la investigación consistió en la evaluación de la contaminación producida por la presencia del mercurio, hierro y cobre en los suelos con vocación agrícola y con una estrecha relación con las principales propiedades químicas del suelo determinados con el análisis multivariado. El estudio se realizó en una parcela de 1,4 ha que estuvo situada a una distancia de 5 km aguas abajo del vertimiento principal de la mina “El Alacrán”. Dentro de la metodología de trabajo fueron extraídos 25 muestras de suelo distribuidas entre zonas eriales y cultivadas. Los parámetros analizados fueron pH, MO, CIC, macronutrientes (S, P, Ca, Mg, K y Na), micronutrientes disponibles (Cu, Fe, Zn, Mn y B), aluminio intercambiable (Al^{3+}), y concentraciones totales de metales pesados Hg, Cu y Fe. Para el análisis de las propiedades químicas de pH, materia orgánica, CIC, macronutrientes (S, P, Ca, Mg, K y Na), micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn y B) y aluminio intercambiable tomándose una muestra compuesta de aproximadamente un kilogramo de suelo. El método estadístico utilizado fue el análisis multivariado. Dentro de los resultados fueron encontrado que el parámetro pH varió entre 3,99 y 5,09, con un promedio de 4,76, clasificados como ácidos extremos hasta ácidos muy fuertes, para el caso de materia orgánica y CIC indicaron que los datos fueron moderados. Los micronutrientes fueron encontrados con un promedio de 83,16 mg Cu.kg⁻¹ de suelo, 74,48 mg Fe.kg⁻¹ de suelo, 5,13 mg Zn.kg⁻¹ de suelo, 178,51 mg Mn.kg⁻¹ de suelo y 0,28 mg B.kg⁻¹ de suelo. Finalmente, los autores concluyeron que existieron rasgos de degradación en las áreas de cultivo como en las zonas eriales, donde la deposición del material de relave sedimentario como resultado de la actividad de extracción de la mina “El Alacrán” representaba un componente del alto riesgo sobre la calidad del medioambiente y

la salud de fauna y flora, así como de los habitantes de la zona, donde se está produciendo la incorporación de metales pesados. Para el caso de cobre que fue encontrado en niveles muy altos se hace necesaria un programa de remediación urgente con el fin de evitar que el efecto negativo de este metal pueda ingresar a la cadena trófica y que al ser consumidos pueda causar serios efectos sobre la salud de la población.

Sotomayor (2016) ejecutó una investigación sobre la “Determinación de metales pesados en suelos aledaños a la Mina “La Platos”, en Bermejillo, Durango”. El objetivo fue caracterizar el estado de las propiedades y el contenido de plomo, zinc, arsénico, cadmio y cobre en los suelos que rodean a la mina “La Platos” ubicada en Bermejillo, Durango, México. Dentro la metodología considerada en el desarrollo del proyecto, fueron tomadas ocho muestras de suelo a una profundidad de 0 – 30 cm para la determinación de los contenidos de Pb, Zn, As, Cd y Cu mediante el método de Absorción Atómica de Perkin Elmer. También fueron consideradas las características fisicoquímicas del suelo: textura, pH, contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica. Los resultados obtenidos con referencia a los metales pesados considerados en el estudio demostraron que estos sobrepasaron los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SERNAT (1996). En base a los resultados obtenidos con referencia a los metales pesados obtuvieron 24,28 mg Pb.kg⁻¹ hasta 29,20 mg Pb.kg⁻¹, 19,05 mg Zn.kg⁻¹ hasta 25,26 mg Zn.kg⁻¹, 0,13 mg As.kg⁻¹ hasta 0,20 mg As.kg⁻¹, 0,15 mg Cd.kg⁻¹ hasta 0,58 mg Cd.kg⁻¹ y 6,18 mg Cu.kg⁻¹ hasta 12,37 mg Cu.kg⁻¹, llegó a la conclusión de que, en cinco muestras de suelos estudiados, los niveles de los metales pesados están por encima de los límites máximo-permisibles establecidos por la norma oficial mexicana. Por lo tanto, tomaron en cuenta que los suelos estaban seriamente contaminados por la acción de la actividad minera que opera en la zona en estudio.

Guerrero y Pineda (2016) desarrollaron el proyecto “Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá (Bajo) (Tausa). Modelo conceptual”. Este proyecto fue desarrollado en Rasgatá Bajo, en Cundinamarca, zona que tiene una vocación productiva local por tradición en el cultivo de la “papa” *Solanum tuberosum* L. El objetivo fue desarrollar “un modelo conceptual del riesgo de contaminación física y química del suelo en la zona Rasgatá Bajo, Cundinamarca”, Colombia, “zona limítrofe declarado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca en 2009”, como “Distrito Regional de Manejo Integrado de los

Recursos Naturales Renovables Páramo Guargua y Laguna Verde” (p. 57). “El estudio siguió un enfoque combinado de investigación documentaria, observaciones *in situ* y medición de características fisicoquímicas para determinar las fuentes y tipos de contaminantes que afectaron al suelo mediante actividades mineras y con riesgos toxicológicos para los organismos vivos “(p 57). “Los resultados obtenidos aportaron al rediseño y evaluación de los planes de manejo ambiental local” (p. 57). Un modelo conceptual del riesgo de contaminación fisicoquímica del suelo fue desarrollado en la vereda Rasgatá Bajo, donde confluyen actividades de extracción y transformación de arcilla y carbón. Los datos obtenidos permitieron llegar a la conclusión siguiente: La confluencia en la vereda Rasgatá Bajo de actividades de extracción y de transformación de carbón y arcilla, fueron las responsables del incremento de la degradación fisicoquímica de los suelos. El proceso de extracción de carbón generó la presencia de residuos sólidos y de aguas residuales domésticas y no domésticas, materiales que, al ser vertidos sin tratamiento alguno, causaron la contaminación del suelo, en función de los niveles de compactación, además de los grados acidez y salinidad, así como la velocidad de mineralización, que favorecieron la acumulación de los metales en niveles tóxicos tanto para la flora, la fauna y para los habitantes de la zona.

Mahecha *et al.* (2015) investigaron el “Contenido de metales pesados en suelo agrícola de la región de Ariari, departamento del Meta”. Esta investigación tuvo como objetivo determinar la concentración de metales pesados (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr) en suelos tropicales altamente degradados (Oxisoles) sometidos a un uso agrícola intensivo por más de 10 años en la cuenca del río Ariari, departamento de Orinoquia, Colombia. La metodología consistió en un muestreo de forma aleatoria simple de los terrenos, previa identificación de terrenos cuyo suelo de uso agrícola intensivo fue por más de 10 años. Los resultados obtenidos permitieron conocer la secuencia de la concentración de los metales estudiados y que en ningún caso esto excedió los límites máximos permisibles establecidos por la Agencia de Protección Ambiental [EPA] (1994) de los Estados Unidos. Asimismo, existió la probabilidad de que los metales pesados estudiados, estuvieron movilizándose en la matriz suelo-planta, de acuerdo con los parámetros fisicoquímicos. Como conclusiones reportaron que los contenidos de metales pesados muestran la siguiente secuencia: Zn (58,6 mg.kg⁻¹) > Cu (17,6 mg.kg⁻¹) > Pb (16,7 mg.kg⁻¹) > Cr 11,9 mg.kg⁻¹ > Ni (7,5 mg.kg⁻¹); para caso el cadmio, la cantidad observada no superó el límite tolerable, teniendo en consecuencia, un

rango de toxicidad menor de los límites de tolerancia que fueron considerados en la investigación. Los suelos ubicados en la región del Ariari que es una zona de producción agrícola muy intensiva y con un alto porcentaje de uso de agroquímicos, no mostraron niveles por encima de valores tolerables considerados en el estudio, asumiéndose que esta condición estuvo asociada con las propiedades fisicoquímicas de estos suelos. También debió tenerse en cuenta que el uso de tecnologías centradas en el mayor rendimiento/rendimiento de los sistemas agrícolas, ha dado lugar a varios problemas ambientales, incluido el uso de pesticidas y fertilizantes, ya que estas son fuentes potenciales de metales pesados.

Chambi *et al.* (2012) realizaron la investigación sobre la “Evaluación de la presencia de metales pesados y arsénico en suelos agrícolas y cultivos en tres microcuencas del Municipio de Poopó” en la ciudad de la Paz, Bolivia. El objetivo de este trabajo fue determinar los contenidos de metales pesados y de arsénico en los suelos y el efecto sobre los productos agrícolas que fueron obtenidos en las microcuencas Venta y Media, Coriviri y Poopó. La metodología consistió en un trabajo de campo y de laboratorio para conocer los principales factores del suelo que afectan la fertilidad de los suelos (pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible) y la presencia de los metales pesados y arsénico, para lo cual fueron tomadas tres muestras de suelos de parcelas agrícolas, una en cada una de las microcuencas estudiadas. Los resultados evidenciaron que los suelos de las parcelas agrícolas de las tres microcuencas tienen textura variada (Francos, franco arcillosos, franco arenosos, franco arcillo arenosos) originados por el tipo de origen de estos suelos. Con base en los resultados del análisis de los parámetros químicos (pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible), la fertilidad de los suelos de las tres microcuencas dio datos variables que los calificaron de baja moderada y contaminados con As, que en algunos casos excedió el nivel máximo (55 mg.kg^{-1}) establecido por la legislación holandesa. Los suelos de la microcuenca Venta Media en su parte alta presentaron alta contaminación con Zn, Pb y Cd, con presencia del plomo en los granos de habas que fueron cultivadas en esta zona. En la microcuenca Coriviri no existieron evidencias de la presencia de los metales pesados pero los niveles de arsénico fueron muy altos, mostraron evidencias de su efecto en los cultivos de papas y de habas. De acuerdo con los resultados, concluyeron que hubo la necesidad de

ejecutar acciones inmediatas en la prevención y mitigación de la contaminación de los suelos por metales pesados que afectaron a la calidad de los productos agrícolas y pusieron en riesgo la alimentación alimenticia.

Belmonte *et al.* (2009) hicieron una investigación para estudiar la “Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del sureste de España”, con el objetivo de evaluar la concentración de metales pesados y/o elementos traza en los suelos agrícolas “adyacente a la sierra minera y valorar el nivel de contaminación por metales en los primeros diez centímetros de la capa arable, teniendo como base los valores de referencia establecidos por diversas legislaciones”(p. 45). La metodología consistió en la toma de “20 muestras de suelo en uso agrícola mediante una distribución aleatoria en un área de 100 km² en el interior de la sierra minera, en escombreras, pantanos mineros y suelos alterados por la actividad minera” (p. 47). Asimismo, fueron tomadas “otras 23 muestras en los cauces principales de 8 ramblas que drenan la sierra minera. Llevaron a cabo 2 tipos de análisis: Fluorescencia de Rayos X y espectrometría” (p.48). Los resultados obtenidos mostraron que los niveles de metales pesados en los suelos agrícolas estudiados superaron escasamente a las concentraciones máximas permitidas por muchas legislaciones para el caso del Cr, Ni y Cu, a excepción de las legislaciones española y alemana, que fueron más tolerantes (p. 51). No obstante, “las concentraciones medias de zinc y sobre todo plomo, superaron ampliamente los límites máximos permitidos por todas las legislaciones consultadas” (p. 51). La presencia del Pb superó en veinte unidades más al nivel permitido como agente de contaminación señalado por “el reglamento holandés, doblando incluso el nivel que está establecido como de urgente necesidad de recuperación de esos suelos, establecido por esa legislación” (p. 51). Mientras que cuadruplicó “el nivel máximo permitido por la Comunidad Europea, que lo establece en 300 mg.kg⁻¹ y es superior al nivel máximo permitido por legislaciones tan permisivas como la alemana” (p. 51). Con respecto al zinc se ha encontrado valores que doblan el nivel máximo recomendado por las normas españolas; asimismo, los niveles encontrados superan del mismo modo a los niveles considerados por la legislación alemana. Concluyeron que, aunque no fue objeto de la investigación realizada, toda el área estudiada soportó un periodo de una fuerte sequía que afectó considerablemente al recurso suelo, generándose una erosión eólica severa, tanto en los suelos agrícolas como en los humedales con restos mineros, provocando de esta manera,

la diseminación de los agentes contaminantes que incluso ingresaron a las vías respiratorias porque las partículas más pequeñas fueron movilizadas en el entorno.

Montenegro *et al.* (2009) ejecutaron un trabajo de investigación sobre “El contenido de metales pesados en suelos cercanos a un relave cuprífero chileno” en la zona norte de Chile. El objetivo de este estudio fue analizar los contenidos de hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), cromo (Cr), cadmio (Cd) y plomo (Pb) en relación con las variables químicas (pH, CE, MO y CIC) en suelos cercanos a un relave de Cu ubicado en el norte de Chile. Dentro la metodología consideró el análisis de los metales pesados disponibles, ejecutándose mediante el método de AAS, y los metales pesados totales mediante el método ICP-OES. Los suelos fueron agrupados en tres sectores teniéndose en cuenta la cercanía del relave, así como el curso de un estero y la dirección del viento. Dentro de los resultados obtenidos, el Cu fue el metal pesado que presentó una mayor concentración con relación al resto de los elementos estudiados. Las muestras que obedecieron el curso del estero presentaron el mayor contenido promedio de Cu, mostrando diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) con relación a los otros dos sectores. Al analizar los componentes principales en las 24 muestras analizadas, encontraron que tres componentes principales significaron el 75,7 % de la variabilidad de los datos. En el gráfico de dispersión de los dos primeros componentes fue observado que un grupo de suelos que estuvieron cercanos al eje de intercepción y cuatro suelos alejados, presentaron los mayores contenidos de Fe con $276,60 \text{ mg.kg}^{-1}$, Cu con $375,10 \text{ mg.kg}^{-1}$, Mn con $56,7 \text{ mg.kg}^{-1}$, Zn con $21,70 \text{ mg.kg}^{-1}$, Cr con $45,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ y Pb con $129,3 \text{ mg.kg}^{-1}$. Finalmente, concluyeron que el Cu fue el metal pesado con mayor concentración en las muestras de suelo y en las zonas cercanas a la fuente de contaminación presentaron los contenidos promedios más elevados (120.1 y 112.0 mg kg^{-1}). En tanto, la magnitud de la contaminación por metales pesados en los suelos cercanos al relave minero dependió del tipo de elemento y de su capacidad de dispersarse por el viento (Cu, Mn, Zn, Cr, Cd y Pb) o depositarse en el suelo (Fe), así como de la cercanía del suelo al relave y a un estero.

Puga *et al.* (2006) hicieron una investigación para conocer la “Contaminación por metales pesados provocada por la industria minera” en el estado de Chihuahua, México, con el

objetivo de realizar una evaluación de la presencia del plomo, cadmio, zinc y arsénico, los mismos que estuvieron contaminando los suelos, en función a diferentes distancias y niveles de profundidad y conocer la relación de estos metales con las características fisicoquímicas. El área en estudio estuvo ubicada en San Francisco del Oro, Chihuahua, México, zona de “confinamiento de desechos de la industria minera” (p. 149). “El estudio abarcó tres km lineales en dirección de los vientos dominantes a partir de la fuente de contaminación” (p. 149). La metodología consistió en el muestreo del suelo a las profundidades de:

0-40, 40-60 y 60-80 cm en 10 sitios de muestreo, distribuidos sistemáticamente en el área de influencia de la presa de jales en dirección a los vientos dominantes, a una distancia de 300 m entre un punto y otro; es decir, a los 300, 600, 900, 1 200, 1 500, 1 800, 2 100, 2 400, 2 700 y 3 000 m (p.149”).

“Los parámetros analizados fueron la textura, pH, contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica mediante la técnica propuesta por Uvalle-Bueno (1993) y modificada por Yáñez (1998)” (p. 149). Los resultados mostraron que la mayor concentración se dio en sitios cercanos a la acumulación de relaves, disminuyendo considerablemente cuando se alejaron de la zona de acumulación. Todos los elementos estudiados estuvieron por encima de los niveles tolerables considerados por las normas internacionales. En tal sentido, el arsénico fue distribuido en función con la distancia a la fuente de origen, la clase textural y el contenido de materia orgánica; la distribución del plomo estuvo relacionada con la “distancia a la fuente y la textura del suelo; el zinc igualmente relacionado con la distancia a la fuente y el cadmio con el distanciamiento de la fuente”, el rango de “pH” y la profundidad efectiva del suelo” (p. 149). Concluyeron en que todos los elementos en estudio fueron encontrados en una mayor proporción en los sitios cercanos a la presa de distribución del agua y en “dos sitios la concentración de As, Pb y Zn, fueron mayores en las profundidades de 40-60 y 60-80 cm que en la superficie” (p 151). “Los niveles de los elementos estudiados superaron notoriamente los niveles propuestos por varias agencias internacionales, por lo que recomendaron “una inmediata recuperación de esta área” (p. 154). La distancia, fue otra de las variables importante en la determinación de los modelos de predicción (p. 154). El Zn fue encontrado en cantidades demasiado altas en toda el área de estudio, considerándose como de alto riesgo para el crecimiento normal las plantas. El Cd y el pH correlacionaron negativamente con la distancia y con la profundidad de suelo. En consecuencia, “estos suelos debieron ser sometidos a un proceso de recuperación con la

finalidad de incorporarlos a las actividades productivas sin riesgo alguno que afecte a los componentes de este ecosistema” (p. 154).

Nacionales

Zapata (2019) investigó el “Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura”, “con el objetivo de evaluar la contaminación por metales pesados en especies vegetales y proporcionar información para futuros estudios de monitoreo y evaluación de riesgo de zonas similares” (p.1). “La zona de muestreo de la vegetación analizada estuvo ubicada en el distrito de Canchaque, región Piura, donde está la mina Turmalina”, que operó durante muchos años” (p.1). “Para la medición del contenido de metales pesados, fue utilizado el método de digestión por vía húmeda y la determinación por espectrometría de absorción atómica (AAS), empleando los recursos existentes en el Laboratorio de Química de la Universidad de Piura” (p. 1). “Los mejores resultados de digestión del material vegetal (hojas y raíces) fueron obtenidos con una relación ácido nítrico – ácido perclórico (4:1), y un tiempo de digestión de 120 minutos” (p. 8). “Los resultados” mostraron una elevada concentración de aluminio, hierro y cobre” (p. 1). “Los metales más tóxicos como el plomo y el cadmio estuvieron por debajo del límite permisible” (p. 8). Además, las especies *Salvia corrugata* Vah, *Baccharis latifolia* (Ruiz y Pavón) Pers., *Pityrogramma tartarea* (Cav.) Maxon, *Gardoquia cf. Sericea* C. Presl ex Benth y *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) Maxon, tuvieron un crecimiento normal en suelos con alto contenido de metales pesados, pero mostraron una alta acumulación de estos metales en hojas y raíces. La concentración de Cu fue un problema local relacionado con los sedimentos de los ríos de Canchaque y con las plantas que se encontraron a los alrededores de la mina. Concluyó “que la absorción de metales pesados mediante vegetación endémica fue una alternativa ecológica para la remediación de suelos en ecosistemas contaminados por la minería, comprobándose que la minería es una de las actividades extractivas con mayores problemas socioambientales” (p. 55). “En el caso de la mina Turmalina al no haber cumplido con un correcto cierre de operaciones, los pasivos ambientales mineros fueron contaminando los suelos y aguas, afectando principalmente a la población de Canchaque” (p. 55).

Avelino (2013) investigó la “Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en Villa de Pasco”, con el objetivo determinar la eficacia de las especies

fitoextractoras en la remediación de los suelos contaminados por elementos químicos metálicos en la zona de Villa de Pasco, de la Provincia de Cerro de Pasco, de la Región Pasco, para desarrollar actividades agrícolas. Las especies consideradas en el estudio fueron el *Sonchus oleraceus* L. (especie A), *Lepidium bipinnatifidum* Desv. (especie B), *Plantago orbignyana* Steinh ex Decne (especie C) y el *Bidens triplinervia* Kunth (especie D) con el fin conocer la capacidad de absorción del arsénico, cadmio, plomo y zinc por las cuatro especies en estudio. La metodología considero el estudio mediante seis estaciones de muestreo que fueron distribuidos dos en la margen derecha, dos en la margen izquierda y dos entre ambos. También fueron evaluados los porcentajes de arena, limo, arcilla y el contenido de materia orgánica. Tanto el pH como la conductividad eléctrica fueron analizados en condiciones de campo (*in situ*). En el análisis foliar fue utilizado el método de Ritter *et al.* (1998) y el contenido total de metales fue determinado por el método ICP-OES. Los resultados obtenidos mostraron que el *Sonchus oleraceus* (especie A), fue la especie con mayor eficacia en la absorción del arsénico, el *Lepidium bipinnatifidum* (especie B), fue la especie con mayor capacidad para absorber cadmio, mientras que el *plantago orbignyana* (especie C) fue más eficiente en la absorción del plomo y el *Bidens triplinervia* (especie D) fue la especies más eficaz en la absorción del zinc. Asimismo, fueron calculados los índices de bioconcentración y el factor de remediación de las especies, concluyendo que las especies consideradas en este estudio representaron un gran potencial en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados y que los suelos remediados con estas especies no causaron ningún riesgo para la salud humana y el ecosistema. Por lo tanto, en los suelos recuperados en la zona de estudio, se podrían desarrollar actividades agrícolas normales.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. El recurso suelo

De acuerdo con el glosario de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (2008), el suelo es considerado una mezcla de residuos minerales en estado suelto que se encuentra en la parte superficial del planeta y que está sujeto a la acción de diversas fuerzas externas que son conocidas con factores de formación que actúan en relación con el tipo de material parental, los organismos, la topografía) y el clima representado por la precipitación, temperatura, humedad atmosférica y evapotranspiración, factores que actúan durante un periodo de tiempo. Al suelo también se le define como el sistema que se ha formado de

manera natural como resultado de influencia de la atmósfera sobre los estratos que se ubican por debajo, con una clara influencia del clima que determina el ciclo hidrológico del planeta. Asimismo, el suelo es el sustrato necesario para el crecimiento de los diversos organismos que habitan en él. El suelo también cumple un importante papel ambiental por lo que es considerado como un reactor biofísico y químico para la descomposición del material orgánico de desecho que es reincorporado dentro del mismo. Desde el punto de vista ambiental al suelo se le define como capa superior fina de la corteza terrestre que es parte de la litosfera, que está situada entre el lecho rocoso y la superficie. El suelo está compuesto por partículas minerales, materia orgánica en proceso de descomposición, agua, aire y organismos vivos diversos. Por lo tanto, es el sustrato fundamental del medio ambiente formado en la superficie terrestre y que tiene la capacidad de soportar el desarrollo de las diversas plantas, de la mayor parte de las actividades naturales del hombre, en estrecha relación la entre el recurso suelo, el aire y el agua, cumpliendo importantes funciones con relación al tipo de uso que se le confiere (Hillel, 1998).

1.2.2. Suelo agrícola

Cuando se habla del suelo agrícola se refiere a un tipo especial de suelo que debe que se caracterice por ser un suelo con un buen nivel de fertilidad, que tenga una alta composición de humus (materia orgánica del suelo), además es un reservorio de varios nutrientes como NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- y otros elementos químicos como Fe^{2+} , Cu^{+2} y Mn^{+2} , estos últimos elementos son esenciales para las plantas en menor cantidad. Los elementos nutritivos mencionados tienen la posibilidad de ser incrementados través de la fertilización que es la práctica que consiste en la aplicación en las zonas con mayor necesidad o carencia. Los fertilizantes que se aplican al suelo no deben ser perjudiciales ni muchos menos tóxicos por qué parte de esas sustancias tóxicas pueden trasladarse a la cadena alimenticia a través los alimentos cultivados. También existen otros componentes del suelo que deben controlarse para que un suelo sea considerado apto para la agricultura, de éstos como ejemplo son el pH del suelo, la textura y la conductividad eléctrica. Estos tres parámetros en niveles normales contribuirán a que los cultivos crezcan normalmente y sean de mejor calidad, para luego ser aprovechados por el hombre sin ningún tipo de problema, convirtiéndose, asimismo, en productos de mayor duración y con resistencia a las

inclemencias del tiempo o de otros factores externos adversos en la producción agrícola (Bembibre, 2011).

1.2.3. Suelo contaminado

Suelo contaminado es aquel que presenta concentraciones de un elemento superiores a su capacidad de amortiguación, produciendo efectos nocivos sobre la estructura y funcionamiento del ecosistema del que forma parte (Diez, 2008). Las fuentes de contaminación son tanto naturales (material parental, incendios y erupciones volcánicas) como antrópicas (industria, agricultura y minería, entre otras). A nivel normativo en España, según referencia de Volke *et al.* (2005, p. 37) es aquel “cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso procedentes de la actividad humana, en concentración tal que sean un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente”.

El Gobierno de España mediante la Ley de Residuos y Suelos Contaminados N° 22-2011 (2011), considera como “suelo contaminado” al recurso edáfico cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes o elementos peligrosos que son incorporados por las actividades humanas, en concentraciones excesivas y que tienen la capacidad de afectar riesgosamente la salud humana o al medio ambiente, especialmente cuando sobrepasan los niveles de tolerancia que son reguladas por las disposiciones del gobierno de una nación.

1.2.4. Movimiento de los metales pesados

El suelo es uno de los principales receptores de una diversidad de sustancias consideradas potencialmente como contaminantes. La condición que tiene el suelo de ser la interface entre la biósfera constituida por la biomasa terrestre, biomasa marina y hombre, la litósfera que está en la corteza como una mezcla de suelo y de sedimentos, la hidrósfera conformada por el agua dulce y agua de mar, y la atmósfera constituida por capas con diversas funciones, lo ubican como una “estación de tránsito” de todos los contaminantes que permanecen retenidos en períodos significativos de tiempo, aumentando la posibilidad de que puedan ser

descompuestos o degradados para perder la condición de contaminante o de incorporarse a a otros medios para finalmente llegar a ser parte de las redes tróficas (Figura 1), con los riesgos que la presencia de los contaminante ocasionarían (Fernández, 2012).

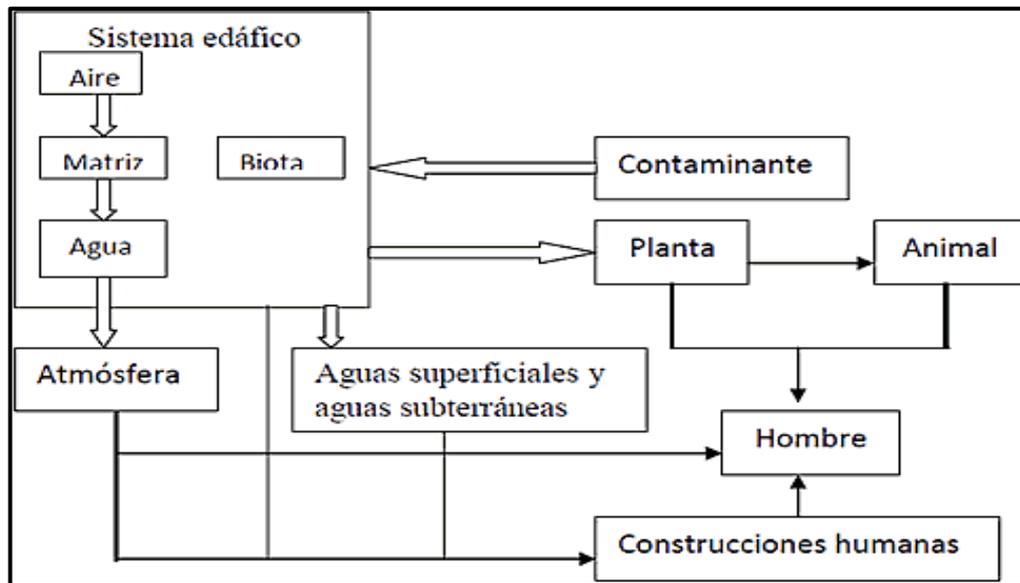


Figura 1. Desplazamiento e interacciones de los contaminantes en el suelo en el sistema planta-animal-hombre. Fuente: Fernández (2012).

1.2.5. Minería

La minería como una actividad extractiva se desarrolla en todo el planeta cumpliendo un papel fundamental como fuente de crecimiento, sustento y desarrollo y es una actividad por la cual se aprovechan diferentes tipos de minerales que se ubican en la corteza terrestre y que son básicos para el bienestar de la humanidad. La minería es una actividad practicada en zonas de diferentes geografías, distintos territorios, con la incorporación de diferentes actores de la sociedad que no se conocían con anterioridad, con la aplicación de modelos de desarrollo y de formas de vida. Por lo tanto, la minería significa el agrupamiento de diversas actividades que están relacionadas con descubrir, explorar y aprovechar los yacimientos que en la actualidad están representados por más de 7.000 tipos de minerales (Martínez, 2014).

Los minerales son definidos como sustancias inorgánicas naturales en forma cristalina y que poseen características físicas y químicas diferentes, como resultado de la actividad geológica en el momento de su formación. Estas sustancias están clasificadas de la siguiente manera: (a) Metales preciosos: Oro (Au), plata (Ar) y los metales del grupo del platino (Pt); (b)

Minerales de uso siderúrgico: Hierro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co), titanio (Ti), vanadio (V) y cromo (Cr), (c) Metales básicos: Cobre (Cu), plomo (Pb), estaño (Sn) y zinc (Zn); (d) Metales ligeros: Magnesio (Mg) y aluminio (Al); (e) Metales nucleares: Uranio (U), radio (Ra), torio (Th) y (f) Metales especiales: litio (Li), germanio (Ge), galio (Ga) y arsénico (As) (Martínez, 2014).

1.2.6. Explotación minera

El desarrollo de las actividades de extracción mineras es la causa de grandes impactos ambientales, tales como destrucción de los suelos naturales y la formación de nuevos suelos que se caracterizan por tener fuertes limitaciones físicas, químicas y biológicas que limitan la instalación y desarrollo de los vegetales, produciendo una serie de consecuencias adversas reflejadas por una destrucción de la estructura del suelo y una consecuente alteración de sus características texturales, con una clara merma de las arcillas, favoreciendo el predominio de las fracciones más gruesas. También son la causa de la acidificación del suelo, aumentando los procesos de oxidación favoreciendo así la dispersión de las especies químicas tóxicas que tienen la capacidad de limitar la actividad biológica; la pérdida de las capas superficiales que son biológicamente las más activas, produciendo la ruptura de los ciclos biogeoquímicos, aumentando la dificultad de enraizamiento, una merma de la capacidad de intercambio y afectando la capacidad de retención de agua en el suelo incrementada por los bajos niveles de la materia orgánica y de la fracción arcilla (Ortiz *et al.*, 2007).

1.2.7. Minería y medio ambiente

“El aprovechamiento de los recursos minerales se vislumbra para muchos países como una forma positiva de crecimiento económico, particularmente en áreas donde la implantación del sector de transformación es escasa o muy deficiente” (p 28). De forma opuesta, “los procesos mineros se asocian, a altos niveles de contaminación y degradación del medio ambiente, por el impacto negativo sobre los sistemas ecológicos” (p 28) (Figura 2) (González *et al.*, 2006).

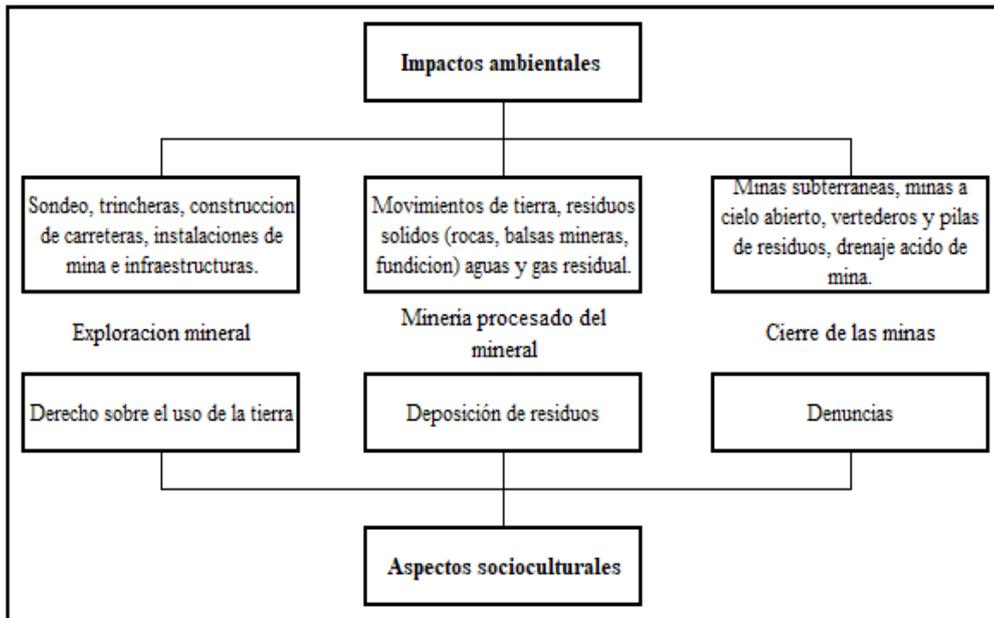


Figura 2. Esquema de procesos mineros con los posibles impactos ambientales. Fuente: González et al. (2006).

1.2.8. Metales pesados

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que se encuentran en la tabla periódica cuyos pesos específicos son superiores a 5 g.cm^{-3} , los mismos que tienen un número atómico superior a 20, con la exclusión de los llamados metales alcalinos y alcalinotérreos (Tiller, 1989). El término metal pesado resulta impreciso si se tienen en cuenta las propiedades físico-químicas de estos elementos, sobre todo lo relacionado con las propiedades iónicas y biológicas que son muy complejas. Por estas razones se utilizan otros términos tales como “metal tóxico” o “elemento traza”, pero ninguna de estas denominaciones se refiere a los mismos elementos, por lo que igualmente estos términos son poco satisfactorios. Tiller (1989) sugiere que el término de “metal pesado” puede ser utilizado de manera general cuando trata de aquellos metales que están considerados como contaminantes del medio ambiente.

1.2.9. Contaminantes con alta toxicidad

Cadmio (Cd)

El Cd es un metal pesado de color blanco, ligeramente azulado, de peso atómico 112 y una densidad relativa de 8. La principal fuente de exposición de los seres humanos al cadmio son los alimentos y el agua, debido a que partículas pequeñas de este elemento pueden ser absorbidas mediante el aparato respiratorio, especialmente en aquellos trabajadores que laboran en la industria del cadmio y en aquellas personas en contacto con el humo del tabaco. En el caso de los animales, estos rangos de absorción son variados, pero en niveles más bajos que en los seres humanos. Las especies de la dieta vegetal que presentan una acumulación significativa de cadmio son aquellos que tienen la característica de ser ricos en fibra como por ejemplo los cereales, vegetales y tubérculos (papas) que contribuyen a una mayor exposición (Londoño *et al.*, 2016). El cadmio no “es un metal pesado esencial para los seres vivos; por consiguiente, este elemento, así como los compuestos derivados de éste, son demasiado tóxicos” (p. 4). “El cadmio es poco abundante en la corteza terrestre pero algunos suelos pueden adquirir niveles altos de cadmio debido a que las rocas que dieron origen al suelo contenían el elemento en su composición natural (p. 4). A finales del siglo XX la presencia del cadmio en el medio ambiente se ha incrementado debido a ser un subproducto originado por el desarrollo industrial, tales como la minería y el proceso metalúrgicos de los metales, actividad que está afectando de forma progresiva a los diferentes ecosistemas (Zapata, 2019).

Según Zapata (2019) la principal fuente de contaminación producido por el cadmio en la humanidad es la ingesta de alimentos vegetales que están contaminados con este metal, debido a que el cadmio es un elemento biopersistente, y al ser absorbido por la materia orgánica permanece por mucho tiempo, aunque puede excretarse de manera eventual. La exposición en los seres humanos a largo plazo origina muchas enfermedades como por ejemplo la disfunción renal o las enfermedades que afectan a los pulmones. También afecta negativamente al tejido óseo, convirtiéndose en una de las posibles causas de la osteoporosis.

Cromo (Cr)

En un elemento químico que tiene el término Cr como símbolo, con número atómico es 24 y con un peso atómico de 51,996. Este metal pesado es de color blanco plateado y tiene la característica de ser duro y quebradizo. El cromo está presente en el medio ambiente en donde se le puede encontrar en forma natural en un amplio número de alimentos en la forma de oligoelemento (Cr III), convirtiéndose en contaminante para los alimentos cuando adquiere su forma tóxica (Cr VI), la misma que puede ser transmitida a los seres humanos mediante el consumo de alimentos que tienen altas concentraciones de cromo. Asimismo, el cromo tiene una alta distribución en la naturaleza ya que se encuentra en las rocas, el suelo, el agua, el polvo y el gas producidos por la actividad volcánica, y también está presente en una diversidad de estados de oxidación. El cromo en su estado trivalente (Cr III) puede estar en forma natural en muchos alimentos tales con la carne, mariscos, huevos, cereales integrales, frutos secos, frutas frescas y verduras. Es también importante tener en cuenta que el cromo es esencial cantidades pequeñas para un adecuado mantenimiento de la salud por ser potenciador de la acción de la insulina debido a que influye en el metabolismo de los hidratos de carbono, los lípidos y las proteínas (Rodríguez, 2017).

Las dietas deficientes en cromo están asociadas con enfermedades como la diabetes, así como con deficiencias cardiovasculares, cuyos pacientes deben agregar a la dieta alimenticia como un complemento. El cromo en su forma hexavalente (Cr VI) es liberado al aire, suelo y agua como resultado de las actividades industriales relacionadas a este elemento, tales como la galvanotecnia, la curtiembre de cueros, la producción textil, y por la quema de combustibles fósiles (dentro de ellos el gas natural, el petróleo y el carbón de piedra), el procesamiento de la madera y la obtención del papel. Consecuentemente, la humanidad está expuesta a los elementos contaminantes carne, leche y otros alimentos derivados de los animales o de los vegetales con un alto contenido de cromo absorbido, tanto del suelo como del agua, o simplemente al beber agua contaminada con Cr VI (Rodríguez, 2017).

Plomo (Pb)

El Pb es el metal que tiene 82 como número atómico y su peso es 207, su color gris azulado con tendencia perder brillo al ser expuesto al aire. Tiene la característica de ser muy suave y

maleable y fácil para ser fundido, también es fácil de convertirlo en alambres. Este metal se puede encontrar junto a otros metales de la división radiactiva, tales como el uranio y de torio. Los minerales denominados comerciales contienen algo de plomo, cerca del 3 %, o lo más común: es 10 %. Los minerales de plomo antes de fundirse pueden acumular hasta 40 % o más de plomo. De manera general, el plomo puede encontrarse “casi en todas las rocas de la corteza terrestre; siendo la galena el mineral más común y carece de valor biológico, es decir, no es necesario para el desarrollo de función alguna en los seres vivos” (p 7). De igual forma, este elemento (Pb) no es esencial para el crecimiento de las plantas; sin embargo, se le encuentra conformando al suelo y está disuelto en la solución del suelo que es absorbido por las plantas, con una clara tendencia para su acumulación en la parte superficial o capa arable del suelo. Las plantas que tienen raíces poco profundas son las que tienen una mayor exposición a niveles relativamente más alto, muy al contrario, las plantas con raíces mucho más profundas, la absorción y solubilidad del plomo en el suelo se incrementará al disminuir el pH de este. La presencia del plomo puede afectar al rendimiento de las plantas porque este metal tiene la capacidad de degradar al recurso suelo y producir situaciones adversas sobre los animales y los vegetales. Las cantidades altas en plomo son los responsables de propiciar reacciones bioquímicas con efectos tóxicos en el hombre porque son la causa que dificulta la síntesis de la hemoglobina. El Perú que es considerado el primer productor de plomo en Sudamérica y cuarto a nivel mundial, tiene un elevado contenido en el ambiente como consecuencia de las actividades antropogénicas tales como la industria y la minería (Zapata, 2019).

Está demostrado que la absorción de plomo representa un riesgo sumamente grave para la salud en general y su efecto más notorio es el retraso del desarrollo mental e intelectual que se manifiesta principalmente en los niños, además, causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares en la población adulta. La ingesta accidental de compuestos de plomo produce intoxicaciones debido al uso en la alimentación de por animales de forrajes contaminados o al consumo de alimentos que lo contienen plomo procedente de zonas contaminadas ambientalmente. El plomo puede ser absorbido por vía oral en cerca de un 10 % en adultos y puede incrementarse hasta en un 50 % en la población infantil. El plomo absorbido tiene la posibilidad de almacenarse en riñones, hígado, encéfalo y huesos por tener un movimiento parecido con el calcio. La mayor acumulación de plomo en el cuerpo humano está en la zona ósea donde puede permanecer por un periodo de 20 años, aproximadamente;

durante esa permanencia puede bloquear la función del calcio, afectando seriamente a la síntesis de hemoglobina, causando, además, un daño neurológico (Londoño *et al.*, 2016).

Arsénico (As)

El arsénico es un elemento químico que está ampliamente distribuido dentro de la corteza terrestre. El As es considerado químicamente como un metaloide porque se caracteriza por tener propiedades tanto de un metal como de un elemento no metálico. Sin embargo, se le considera de manera frecuente como un metal. “El arsénico elemental que, conocida también arsénico metálico, es un elemento sólido que tiene un color gris acerado” (p 27). Además, “en el medio ambiente se encuentra en combinación con otros elementos como el oxígeno (O), cloro (Cl) y azufre (S), cuyos compuestos con estos elementos son conocidos como compuestos arsénico-inorgánicos” (p 27). El arsénico combinado con carbono (C) e hidrógeno (H) es conocido como arsénico orgánico” (p 27). (Agencia para sustancias tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR] (2007).

1.2.10. Propiedades del suelo y metales pesados

Los metales pesados que están disponibles en el suelo son afectados por la reacción del suelo (pH), la cantidad y el tipo del material arcilloso, el porcentaje del material orgánico en descomposición, la capacidad de los coloides para el intercambio de cationes y algunas características de los suelos que le permiten ser únicos con relación al manejo de los contaminantes. Con la excepción del molibdeno, selenio y arsénico, el movimiento y disponibilidad de los metales pesados disminuye al incrementarse el pH causando la precipitación de estos minerales que adquieren la forma de hidróxidos, carbonatos o incentivando la formación de complejos orgánicos biodisponibles (Smith, 1996). La persistencia de la contaminación en el suelo causada por los metales puede durar por periodos de tiempo demasiado largos o mejor dicho por muchísimos años. Los metales pesados que se incorporan al suelo en cantidades mínimas se ubican en lugares específicos de adsorción, donde son retenidos fuertemente en los coloides orgánicos e inorgánicos que tiene el suelo (Sauvé *et al.*, 2000). Cuando se realizan incrementos continuos de metales pesados en los suelos puede producirse una acumulación que alcanza niveles tóxicos que afectarán el crecimiento normal de las plantas (Vera *et al.*, 2015).

1.2.11. Factores que afectan a la disponibilidad de los metales pesados

Según Fernández (2012), para conocer el comportamiento de los metales pesados en los suelos debe considerarse el efecto que producen el pH, la textura, las condiciones de redox, los niveles de materia orgánica, el tipo de la capacidad de intercambio catiónico y la presencia de otros elementos presentes en el suelo.

pH

El pH expresa el grado o rango de acidez o alcalinidad en los suelos, los rangos varían de 1 a 14, donde el valor 7 es neutro. Un pH por debajo de 7 es ácido y por encima de 7, es básico o alcalino. Para obtener rendimientos significativos y lograr una mayor productividad en las actividades agrícolas, el pH del suelo debe encontrarse entre los rangos de 6,5 a 7,0, debido a que en dicho rango los nutrientes son disponibles y fácilmente asimilables por la mayoría de los cultivos (Catalán, 2016).

El pH es una propiedad química del suelo y es el principal factor que controla la disponibilidad de los nutrientes minerales requeridos por las plantas. La mayor parte de los metales tienen la tendencia de estar más disponibles cuando el pH es ácido; debido a que, al producirse un descenso de este, se produce una mejora en la solubilidad de los metales incrementando la capacidad de absorción por las raíces de las plantas. En algunos casos el incremento del pH del suelo no provoca una notoria merma en la disponibilidad de los metales como ocurre con el arsénico (As), molibdeno (Mo), selenio (Se) y cromo (Cr). Por estas razones, el pH es considerado como un parámetro muy importante para conocer el movimiento de los cationes, ya que en medios de pH moderadamente alcalino se producirá la precipitación en forma de hidróxidos al combinarse con otros minerales. Sin embargo, en medios demasiado alcalinos estos hidróxidos pueden de nuevo volver a la solución del suelo conformando hidroxicomplejos. Asimismo, otros metales como es el caso del selenio (Se), vanadio (V), arsénico (As) y cromo (Cr), pueden estar en la disolución en la solución del suelo en forma de aniones solubles (Fernández, 2012).

Textura

La textura del suelo está comprendida por pequeñas cantidades específicas de arcilla (< 0,002 mm de diámetro), limo (0,02-0,002 mm) y arena (2,0-0,02 mm). Está relacionada también, con las reacciones específicas de superficie del suelo y la capacidad de intercambio catiónico. Mediante la textura se puede determinar distintas propiedades del suelo como la porosidad, la capacidad de retención de agua (CRA) y la cantidad de nutrientes presentes en una proporción de suelo. Por lo general los suelos arenosos suelen ser ligeros con poca inercia térmica y con alta penetración radicular, pero de difícil compactación por ser permeables y de gran facilidad de aireación. Este tipo de suelos son fáciles de labrar y presentan poca capacidad para retener nutrientes y agua. Además, por las características que presenta tiene baja capacidad de fijación de metales pesados, ocasionando que estos se sedimenten de manera más fácil a los horizontes subyacentes contaminando así los niveles freáticos. Por otro lado, los suelos arcillosos presentan gran inercia térmica, difíciles de labrar y con una fertilidad química muy elevada; son de fácil compactación la cual impide la penetración radicular. Por lo general suelen presentar problemas de encharcamiento y drenaje debido a que presentan una alta capacidad de retención de agua y una escasa aireación (Larios, 2014) para obtener los mayores rendimientos y la mayor productividad en las actividades agrícolas.

La arcilla tiene la capacidad de adsorber a los metales pesados y los retiene en sus posiciones de cambio. Cada tipo de arcilla tiene valores determinados en superficie específica en función a las cargas eléctricas que la caracterizan y que son las que controlan la capacidad de adsorción de estos minerales. La capacidad de intercambio catiónico es menor en el caso de las arcillas tipo 1:1 que pertenecen al grupo de las caolinitas. De igual modo, es baja en las micas y alta para las arcillas del tipo 2:1 como las esmectitas y adquieren un máximo valor en las vermiculitas. Los suelos que tiene una textura fina con predominio de las arcillas se originan a partir de los minerales secundarios que tienen la capacidad de alterarse con facilidad y son la fuente principal de metales pesados. Al contrario, los suelos de textura gruesa o arenosa tienen minerales primarios como es el caso del cuarzo, compuesto que se caracteriza por tener un bajo contenido de metales pesados (Fernández, 2012). Agronómicamente, es mucho mejor disponer de un suelo de textura media o franca donde sean equiparables los porcentajes de arena, limo y arcilla. En general los suelos de franca

poseen características intermedias entre las que caracterizan a los suelos arenosos y arcillosos. En consecuencia, la fertilidad del suelo dependerá en cierto modo de la capacidad que tenga éste para formar una buena estructura (Larios, 2014).

Óxido-reducción

Varios elementos metálicos tienen la capacidad de formar sulfuros casi insolubles en condiciones de una alta reducción. Dentro de este grupo están el cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni), cobalto (Co), cobre (Cu) y plomo (Pb). En cambio, otros metales como hierro (Fe) y el manganeso (Mn) son mucho más solubles mediante la reducción (Fernández, 2012). La causa de que un metal pesado se encuentre en forma oxidada o reducida es debido al proceso de oxido-reducción, haciendo que este presente una mayor o menor estabilidad (Galán y Romero, 2008). Una alteración en el proceso redox puede incrementar la solubilidad de los metales (Larios, 2014).

Material orgánico

La materia orgánica que se encuentra en el suelo tiene una afinidad significativa por ciertos metales minerales como el cobalto (Co), cobre (Cu), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), y reaccionan con éstos con una clara influencia en la disponibilidad. Esta disponibilidad de los metales de manera general se asocia con la formación de complejos de los metales con la materia orgánica en descomposición conocidas como sustancias húmicas y con otros compuestos que tienen un alto peso molecular. Estos metales, una vez que se formaron estos complejos, tienen la capacidad de migrar más fácilmente hacia las capas profundas del suelo o de mantenerse disponibles en la solución del suelo conformando complejos denominados órgano-solubles (Fernández, 2012). La materia orgánica tiene una estrecha relación con la estructura del suelo porque participa en la formación de los agregados que son los compuestos que determinan el movimiento de circulación del agua en el suelo. Del mismo modo, la estructura controla el crecimiento de las raíces de las plantas, evitando la fácil erosión y la formación de una capa impermeable en la superficie terrestre regulando la aireación del suelo. La capacidad de retención de agua (CRA) de un suelo está relacionada directa y proporcionalmente con el porcentaje de materia orgánica en descomposición (humus) que tiene la capacidad de absorber agua hasta 15 veces con relación a su peso. Proporciona, además, los nutrientes requeridos por los microorganismos del suelo

y estimula la actividad de éstos por ser el origen de reguladores del crecimiento y desarrollo de las plantas (Larios, 2014).

Así mismo, el contenido de la materia tiene una relación directa con el nivel de fertilidad del suelo, porque le proporciona los nutrientes que requieren los cultivos por medio de la descomposición o mineralización. Además de proporciona al suelo una gran capacidad de almacenamiento de estos, anulando las pérdidas de los nutrientes por lixiviación o lavado, también es parcialmente responsable del efecto tampón que tiene el suelo para controlar los niveles de acidez o alcalinidad, evitando un cambio brusco. Los metales pesados que se encuentran en el suelo son cationes inorgánicos de carga positiva (+) que fácilmente se adhieren a los cuerpos de la materia orgánica que presentan cargas negativas (-), esto sucede a través de las fuerzas electrostáticas, dando origen a procesos de quelatización. Los metales pesados una vez quelatados o en forma de complejos se movilizarán con mayor amplitud en todo el perfil del suelo. Asimismo, los compuestos orgánicos pueden adsorber muy fuertemente a algunos metales, como sucede con el Cu, el mismo que puede no ser disponible por las plantas. En consecuencia, los vegetales que se desarrollan en suelos con altos contenidos de materia orgánica manifiestan los síntomas de deficiencia de algunos elementos nutritivos, como sucede en el caso del Cu (Zhao *et al.*, 2007).

Al contrario, el Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables (Alloway *et al.*, 2013). La complejidad que presentan los suelos por la materia orgánica es la causa muy importante en el proceso para producir que los elementos químicos (metales pesados) sean solubles y bioasimilables, aumentando de esta manera los niveles de toxicidad de estos elementos al aumentar significativamente las posibilidades de dar origen a la formación de compuestos órgano-metálicos, cuya estabilidad de estos complejos con respecto a la degradación producida por acción de los organismos del suelo, constituye la razón de mayor importancia en la persistencia de los niveles de toxicidad. Además, la necesidad en demasía de los quelatos tiende a mermar, en cierto modo, los niveles de concentración de otros iones metálicos tóxicos que están presentes en la solución del suelo (Larios, 2014).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La CIC es una propiedad del suelo que está determinada por contenido y tipo de arcilla y la materia orgánica presente en el suelo, teniendo la función de controlar la disponibilidad de los metales, de manera similar que el contenido de la materia orgánica. De manera general, existe el criterio de que al aumentar la CIC se produce un incremento en el periodo de tiempo en que estos metales estarán en formas disponibles para ser absorbidos por las plantas debido al aumento de la capacidad de fijación que tienen los suelos. La capacidad de intercambio catiónico indica la cantidad iones con carga positiva (cationes) que pueden ser adsorbidos por una unidad de masa en el suelo (cmol.kg^{-1}) (Fernández, 2012). Las partículas coloidales que tiene el humus y la arcilla y que están presentes en el suelo, son la causa de la formación de micro agregados con carga negativa. Los cationes presentes en el agua del suelo por lo general son adheridos a la superficie de estos micro agregados. Estos cationes (+) adsorbidos se mueven constantemente entorno de los coloides de manera que se pueden intercambiar entre ellos. Las partículas formadas por la arcilla y el humus que tiene la capacidad de intercambiar iones de los elementos nutritivos es el que recibe el nombre de complejo arcillo-húmico (CAH) o complejo de cambio (Larios, 2014).

La capacidad de intercambio catiónico es la propiedad que tiene un suelo para almacenar nutrientes en forma de cationes y que se encuentran retenidos por el complejo de cambio, de donde tanto el Na^+ y como el K^+ pueden ser fácilmente lavados puesto al estar retenidos con menor fuerza. Asimismo, los nutrientes retenidos en el complejo de cambio pueden intercambiarse con aquellos que están disueltos en la solución del suelo, quedando de este modo disponibles para ser tomados por las plantas mediante el proceso de absorción del agua por las raíces (Larios, 2014).

1.2.12. Peligrosidad de los metales pesados

El Observatorio de Sostenibilidad (2017) aclara que los suelos contaminados presentan diversos efectos que van desde el riesgo tóxico para la salud humana hasta pérdidas significativas en la, pérdida de los recursos naturales y económicos.

Los principales peligros que pueden manifestarse en un suelo contaminado son los siguientes:

Riesgo toxicológico para la salud

Los peligros que representan, para la salud humana, pueden ser problemas alérgicos y respiratorios por inhalación, fisiológicos y metabólicos debido a la ingestión de productos cultivados en zonas contaminadas; y problemas tóxico - cutáneos en aquellas personas que manipulan objetos contaminados o están en contacto directo con estos metales. La explosión o fuego, corrosión de estructuras o efectos en las propiedades mecánicas del suelo no pueden ser identificados inmediatamente y los peligros potenciales que producen pueden demorar muchas décadas para manifestarse como efectos de gran proporción. Cada metal, así como cada elemento químico que es contaminante, tiene una forma de acción y una zona de acumulación preferente. Al respecto, por ejemplo, el plomo tiene la capacidad de afectar a varios sistemas, deteriora el sistema nervioso dañando a las neuronas, que se encuentran ubicadas en el cerebro. El plomo también tiene efectos negativos sobre la médula ósea y otros lugares donde es encontrarlo de manera frecuente, en los riñones, específicamente afecta peligrosamente al sistema tubular de las nefronas (Eróstegui, 2009).

Otro metal es el cadmio, que afecta a los riñones, por otra parte, tenemos el arsénico, que no es precisamente un metal, pero contamina, de manera que tiene efecto directo en las mitocondrias. Son varios daños que causan dependiendo de cada metal, mayormente lesiones celulares. La intoxicación por plomo puede simular la esclerosis, que es un mal degenerativo y muy complicado con referencia a la sintomatología, además la ingestión plomo en cantidades excesivas afecta al sistema nervioso que se manifiesta como parestias, paresias, fatiga y otros; también produce una disfunción, en general. Otra consecuencia significativa del plomo, son los vínculos que aumentan los riesgos de acciones antisociales, así como la existencia de problemas de retardo mental, causado por la pérdida de la habilidad cognitiva. En cuanto a los riñones, con el transcurrir del tiempo producen insuficiencia renal (Eróstegui, 2009).

Peligros respecto al medio ambiente

Según Eróstegui (2009) los efectos respecto al medio ambiente son bastante graves. Los metales pesados cambian la alcalinidad del suelo dependiendo mucho de la concentración, esto conlleva a la contaminación del agua disponibles y de los cultivos de plantas. La existencia de una excesiva cantidad de plomo puede producir severas alteraciones en las plantas, porque degrada al suelo, disminuyendo así la productividad de los cultivos. Si la contaminación es demasiado excesiva, contribuye en la desertificación. A nivel de las fuentes de agua como los ríos y lagos, afecta seriamente a la fauna existente. La contaminación del medio ambiente debido a la presencia excesiva de los metales pesados produce un efecto silencioso casi imperceptible que no se nota a simple vista y que muchas veces al notar el daño producido, ya todo es tarde porque el efecto del contaminante ha sido desbastador; representa un peligro significativo para la salud. Actualmente se están adoptando medidas interesantes al respecto, aunque los altos costos solo permiten que algunos países industrializados puedan aplicar estas medidas con la seriedad que se requiere.

1.2.13. Efecto de metales pesados sobre las plantas

Según Navarro *et al* (2007) la presencia de metales como contaminantes pueden producir en las plantas diferentes alteraciones (Tabla 1), aunque es difícil detallar a todas, en la siguiente tabla se señala los principales efectos que tienen los metales pesados:

Tabla 1

Efecto de metales pesados en las plantas

METAL	EFFECTOS
Aluminio	Inhibición de la división celular, alteración de la membrana celular y de las funciones a nivel citoplásmico.
Arsénico	Reducción del crecimiento y alteración de la concentración de Ca, K, P y Mn en la planta.
Cadmio	Inhibición de la fotosíntesis y la transpiración. Inhibición de la síntesis de clorofila. Modificación de las concentraciones de Mn, Ca y K.
Cobre	Desbalance iónico, alteración de la permeabilidad de la membrana celular, reducción del crecimiento e inhibición de la fotosíntesis.
Cromo	Degradación de la estructura del cloroplasto, inhibición de la fotosíntesis. Alteración de las concentraciones de Fe, K, Ca y Mg.

Continuación

Mercurio	Alteración de la fotosíntesis, inhibición del crecimiento, alteración en la captación de K.
Plomo	Inhibición del crecimiento, de la fotosíntesis y de la acción enzimática.
Zinc	Alteración en la permeabilidad de la membrana celular, inhibición de la fotosíntesis, alteración en las concentraciones de Cu, Fe y Mg.

Fuente: Navarro *et al.* (2007).

1.2.14. Disponibilidad de los metales pesados en el suelo

Según Fernández (2012), Las diferentes formas en que los metales pesados pueden estar en el suelo son:

- a. En la solución del suelo en forma soluble-
- b. Integrando el complejo de cambio como iones intercambiables
- c. Juntamente con la materia orgánica formando compuestos complejos.
- d. En los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, sulfuros y fosfatos en forma adsorbida
- e. En los minerales secundarios del suelo constituyendo principales componentes.

1.2.15. Efectos de los metales pesados

Los metales pesados producen en el suelo los siguientes efectos:

- a. Afecta el ciclo biogeoquímico y la función de biofiltro debido a la suspensión de la actividad de las enzimas por disminución de la capacidad antodepuradora en los procesos normales de bioregeneración a consecuencia de haberse acumulado en cantidad que superan la capacidad de almacenaje del suelo.
- b. Incremento notorio de la fragilidad del sistema como consecuencia de la mema cualitativa y cuantitativa en el aumento de las poblaciones de los microorganismos del suelo y los organismos superiores del suelo, produciendo un cambio en la diversidad.
- c. Merma en el rendimiento y Afecta a la productividad de los cultivos al producir una clara merma de los rendimientos de plantas cultivadas.
- d. Cambios en la calidad de los productos con un aumento de riesgos para la salud de los consumidores, por la incorporación de elementos tóxicos en la cadena alimenticia.

1.2.16. Los metales pesados y su comportamiento en el sistema suelo-planta

Según Fernández (2012) al ser el sistema suelo-planta es un sistema abierto que está sujeto a la incorporación de variados componentes tales como los agentes contaminantes, los fertilizantes y los pesticidas, a lo que se suman las pérdidas causadas por la lixiviación o lavaje, la erosión en sus diferentes formas o los procesos de volatilización, además de la incorporación de los metales pesados en las plantas, se produce una clara influencia que se inicia en el suelo y continúa a través de las raíces, en función a otros factores como el tipo de suelo, la temperatura, el pH, la aireación, las condiciones redox y la fertilización, la especie de la planta, la etapa del desarrollo y el tipo de sistema radicular, entre otros. Las plantas aparte que pueden absorber cantidades significativas de nutrientes mediante el sistema radículas. Asimismo, es posible la incorporación de algunos elementos nutritivos mediante la absorción foliar. Los iones metálicos pesados al ser absorbidos tienen la capacidad de movilizarse a través de toda la planta, dependiendo de la clase del material metálico absorbido, así como del órgano de la planta es contaminado en estrecha relación con la edad del vegetal. De manera general, los elementos adsorbidos tienen un movimiento en el interior de las plantas de acuerdo con la siguiente relación: Cd>B>Zn>Cu>Pb.

Según se observa en la Figura 3, los metales pesados que se encuentran en el suelo siguen cuatro vías diferentes:

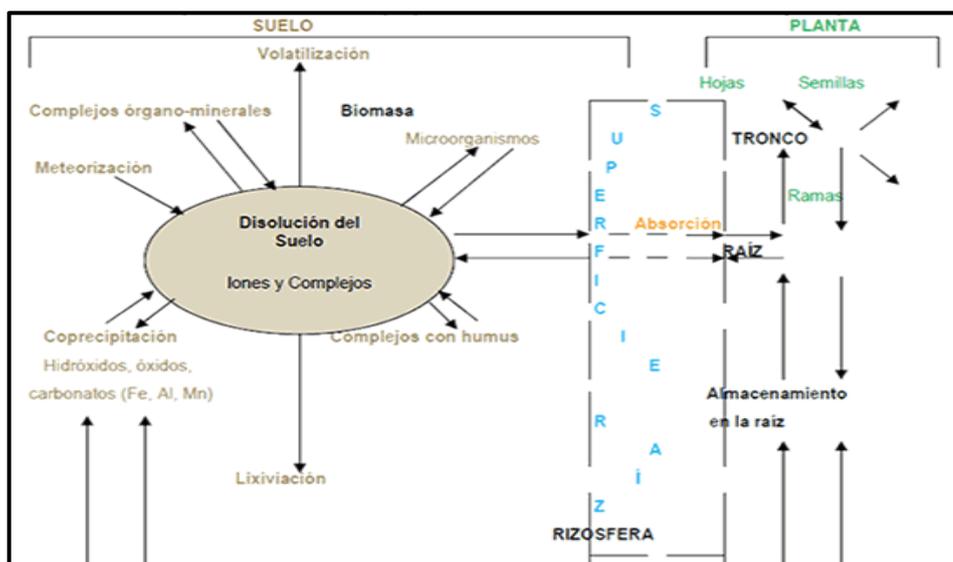


Figura 3. Movimiento de los metales pesados dentro del sistema suelo-planta. Fuente: Fernández (2012).

- a. Pueden estar disponibles en la solución del suelo o bien adsorbidos, complejado y/o precipitados.
- b. Pueden ser absorbidos por las plantas y luego ser incorporados a las cadenas alimenticias.
- c. Por el proceso de volatilización pueden ubicarse en la atmósfera.
- d. Pueden ser trasladados mediante las aguas superficiales y subterráneas.

Al ser incorporado al suelo un metal pesado en forma de contaminante produce una serie de reacciones físicas, químicas o biológicas que no solo afectan al sistema suelo, sino que también alteran al resto de los componentes ambientales, siendo la más afectada la cadena trófica. Por lo tanto, al evaluarse el impacto ambiental originado por metales pesados al convertirse en contaminantes en el sistema suelo-planta, se hace necesario conocer las propiedades del contaminante, tanto del medio receptor como de su entorno y de las formas que controlan la acción del contaminante y cómo se produce una posterior transferencia a las plantas. Cuando un elemento contaminante se incorpora al suelo, puede ser condicionado por procesos de transformación, retención y transporte (Fernández, 2012).

1.2.17. Exposición de los metales pesados y su efecto en la salud y el ambiente

Los metales que están en el medio ambiente tienen un origen natural y antropogénico. Estos metales tienen la capacidad de movilizarse mediante el agua, el suelo y el aire. Además, son muy persistentes, debido a que pueden no pueden formarse ni ser degradados, mediante procesos biológicos ni por acción del hombre. En consecuencia, la inhalación y la ingesta de alimentos son las causas más importantes de este tipo de contaminación. Es importante recalcar que la toxicidad dependerá del tipo de metal, de la cantidad en que encuentra en el medio y de la edad de la población expuesta al efecto contaminante.

A través de diversos estudios se ha demostrado que la contaminación causada por los metales pesados en los alimentos, así como en la carne y la leche, demostrando que el cadmio, el mercurio, el plomo y el arsénico, son los cuatro de los elementos pesados que debido al impacto que producen en la salud, humana merecen una cuidadosa evaluación, debiéndose ser monitoreado y estudiados. Con una especial dedicación. Las fuentes de contaminación y

la incorporación de los metales pesados en la cadena alimenticia, se ilustra claramente en la Figura 4 (Reyes *et al.*, 2016).



Figura 4. Contaminación por metales pesados en el aire, suelo, agua y planta. Fuente: Reyes *et al.* (2016).

1.2.18. Biorremediación

La biorremediación es un proceso que se sirve de diversos microorganismos como los hongos, plantas superiores e inferiores o enzimas producidos por los citados, los mismos que sirven para recomponer y recuperar el medio ambiente que ha sido modificado por efecto de los contaminantes que han producido una alteración en su condición natural. La biorremediación es utilizada para eliminar contaminantes específicos presentes en el suelo, por ejemplo, la acción bacteriana en compuestos órgano - clorados o de hidrocarburos para evitar su degradación (Iturbe, 2010).

Los tipos de biorremediación son los siguientes:

- a. **Fitorremediación** (phyto = planta y remediación = mal por corregir) consiste en un proceso que tiene en cuenta la utilización plantas con la finalidad de remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o eliminar diversos contaminantes ya sean de origen orgánicos e inorgánicos en suelos, lodos y sedimentos. Este proceso puede ser

aplicado tanto in situ como ex situ. Los principales mecanismos o formas de la fitorremediación incluyen procesos conocidos como rizodegradación, fitoextracción, fitodegradación y fitoestabilización (Bayón, 2015).

- b. **Fitocorrección** consiste en un grupo de técnicas recientes que están basadas en el uso de especies vegetales asociadas a microorganismos que tiene la capacidad de extraer, acumular, inmovilizar o transformar los contaminantes metálicos que están incorporados en el suelo (Bayón, 2015).
- c. **Fitofiltración** se basa en las características que tiene ciertos tipos de plantas acuáticas que se desarrollan en los humedales, entre ellas algas, bacterias y hongos que tienen condiciones de ser buenos biosorbentes de varios metales pesados al tener la capacidad de absorber elementos químicos a partir de aguas contaminadas mediante sus sistemas radiculares, como por ejemplo la especie *Typha phragmatites* Adans (Valdés y Fernández, 2015). Al final de siglo pasado, se agregaron nuevas posibilidades con el uso de plantas terrestres desarrolladas en sistemas de cultivos hidropónicos que poseen masas radiculares abundantes y con capacidad para “filtrar”, adsorber y absorber metales desde medios acuáticos (Castro, 2013).
- d. **Fitovolatilización o biovolatilización** que consiste en un proceso de transferencia de contaminantes desde el suelo o el agua hacia la atmósfera, en el cual las plantas son una especie de intermediarios. La fitovolatilización consiste en la absorción y transformación o reespeciación de los contaminantes en formas volátiles, estos contaminantes finalmente son emitidas a través varios órganos de las plantas como las raíces, los tallos y las hojas. Esta técnica es más aplicable para contaminantes orgánicos. Sin embargo, existen muchas investigaciones que demuestran el potencial de algunas especies de plantas para la volatilizar y la eliminación de metaloides como es el caso del selenio (Chávez, 2014).

Asimismo, en la actualidad se cuenta con otras técnicas más adecuadas para contaminantes orgánicos, conocidas como fitoestimulación o rizodegradación (Figura 5), que está basada en la función de exudación de compuestos orgánicos y de nutrientes que estimulan el crecimiento microbiano en la rizosfera y que se producen en el sistema radicular de las plantas (Diez, 2008).

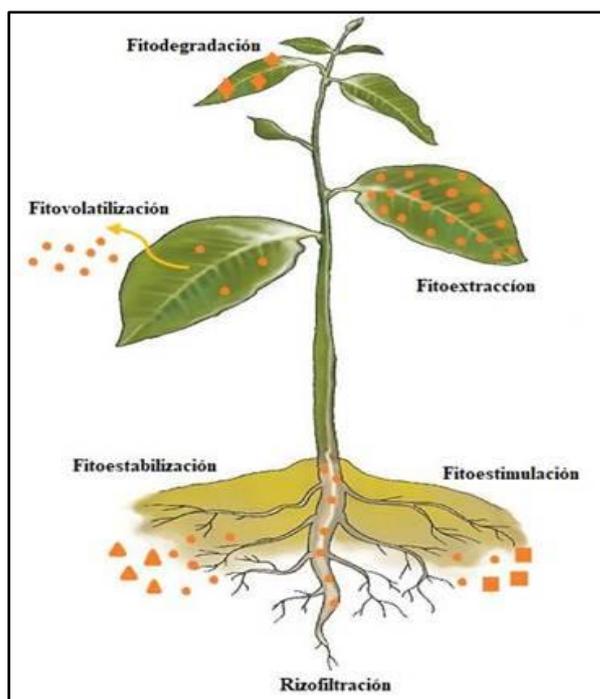


Figura 5. Tipos de fitorremediación. Fuente: Bayón (2015).

La fitorremediación es una técnica que se basa seis procesos básicos mediante los cuales las plantas hacen posible la recuperación de suelos y de aguas contaminadas (Tabla 2). En función de cómo se aplica la estrategia de recuperación, los procesos darán lugar a la retención o a la extracción de los contaminantes que está presentes en el suelo. La fitoestabilización y la fitoinmovilización son parte de inicial de las dos estrategias de la retención, mientras que la fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizofiltración involucran procesos de eliminación (Bernal, 2007).

Tabla 2

Tipos de biorremediación

Tipo de biorremediación	Proceso involucrado por las plantas	Contaminantes que pueden ser tratados
Fitoextracción	Las raíces y las hojas de los vegetales son utilizados para la extracción los metales	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc.
Rizofiltración	Las raíces de las plantas son utilizadas para absorción, precipitación y concentración de los metales pesados de los efluentes contaminados líquidos y para degradar compuestos orgánicos.	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc, isótopos radiactivos, compuestos fenólicos.

Continuación

Fitoestabilización	Las plantas que son tolerantes a metales se usan para reducir la velocidad de estos y así bloquear el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de desechos de los yacimientos mineros, Útil para compuestos fenólicos y clorados.
Fitoestimulación	Son utilizados los radicales exudados para aumentar las poblaciones de microorganismos con capacidad degradativa como lo hongos y bacterias.	Hidrocarburos derivados del petróleo y los poliaromáticos (benceno, tolueno, antraceno, etc.).
Fitovolatilización	Se usan plantas que captan y modifican a los metales pesados o compuestos orgánicos liberándolos hacia la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados: Tetraclorometano y triclorometano.
Fitodegradación	Uso de plantas acuáticas y terrestres con capacidad de captar, almacenar y degradar compuestos orgánicos para convertirlos en productos de menor toxicidad o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono y nitrotolueno), antraceno, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: Ortega et al. (2015).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

En el presente trabajo de investigación no experimental, descriptivo y correlacional y se ejecutó con la observación directa en el campo de los perfiles de suelo considerados en el estudio. El estudio se determinó en base a lo recomendado por Hernández *et al* (2012), quien dice que en este tipo de investigación se toman en cuenta los datos observados tal como son, sin ningún cambio ni alteración.

2.1.1. Lugar y fecha

El trabajo de investigación se ejecutó en los suelos adyacentes a la Empresa Minera “Antamina”, en el sector de Contonga, ubicados en el distrito de San Marcos, provincia de Huari y departamento de Ancash - Perú; aproximadamente a 4 km de la ciudad de San Marcos y 200 km de la ciudad de Huaraz. Su ubicación geográfica es de 9° 31’ 01” de latitud sur y de 77° 13’ 59” longitud, así como a una altitud de 4 500 m.s.n.m.

El distrito de San Marcos es uno de los dieciséis distritos más extensos, con 557 km², que integran a la provincia Huari, departamento de Ancash. El distrito fue creado el 3 de mayo de 1955 mediante Ley N° 12301. Cuenta con una población total de 10 725 habitantes (INEI, 2017). Los cultivos que predominan son “papas” *Solanum tuberosum* L. de las variedades “Yungay”, “Canchan”, “Huairo” y “Nativas”, “olluco” *Ullucus tuberosus* L. y “oca” *Oxalis tuberosa* L. En cuanto a cereales, “maíz” *Zea mays* L. “choclo” Blanco Urubamba, “cebada” *Hordeum vulgare* L, “trigo” *Triticum aestivum* L., “arveja” *Pisum sativum* L., “habas” *Vicia faba* L. y “tarwi” *Lupinus mutabilis* S., desde los 2 760 hasta los 4 300 m.s.n.m. En cuanto a la actividad pecuaria, en la parte baja del valle se cría ganado porcino y caprino, en la zona altoandina se dedican a la crianza ganado vacuno, ovino y camélidos americanos.

La actividad productiva con relación a la crianza de ganado ovino y vacuno de ovinos y vacunos se desarrolla en base de los pastos naturales existentes en las zonas altas, las mismas que crecen en suelos de muy baja fertilidad natural, lo cual, aunado a las deficientes técnicas de manejo y uso del recurso, están generando un pobre rendimiento tanto en leche y carne. Con referencia a la avicultura, las aves de corral que se están criando en la zona de estudio, están representadas por la crianza generalmente para el autoconsumo, de pollos de engorde, gallinas para postura, pavos y patos en menor escala. Además, se ha encontrado un incremento en los años recientes de la crianza de cuyes, actividad familiar promovida por proyectos de desarrollo incentivados por el gobierno nacional y algunos organismos no gubernamentales.

El presente trabajo de investigación tuvo una duración de diez meses, se inició en el mes de enero y concluyó en el mes de octubre del año 2019.

2.1.2. Población y muestra

a. Población

La población estuvo representada por los suelos adyacentes a la empresa minera “Antamina”, que presenta una extensión de 1200 ha, los cuales están consideradas actualmente como tierras agrícolas.

b. Muestra

La muestra fue representada por ocho puntos de muestreo distribuidos al azar considerados de acuerdo con lo sugerido por Etchevers y Padilla (2007). En cada punto de muestreo se abrieron calicatas a las profundidades del perfil de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, respectivamente, luego se colectaron muestras de suelos con un peso aproximado de 1 kg. Las 16 muestras de suelos fueron enviadas a Lima para ser analizadas con respecto al contenido de metales pesados (cadmio, plomo y cromo) en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae.

2.1.3. Técnicas instrumentales

Para la descripción metodológica de los perfiles se utilizó la Guía para la Descripción de Perfiles de Suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2009) y el Manual de Campo para la Descripción y Muestreo de Suelos, propuesto por Schoeneberger *et al.* (2012). El contenido de los metales pesados en las ocho calicatas estudiadas fue evaluado de acuerdo con los límites máximos permisibles señalados por el MINAN (2017) y las comparaciones entre las medias de los metales pesados y las propiedades del suelo fueron hechas de acuerdo con Little y Halls (2002).

2.1.4. Descripción del experimento

El proceso del experimento se desarrolló en cuatro fases, de la siguiente manera:

Fase preliminar

Esta primera fase comprendió el reconocimiento del área de estudio, la recopilación de la información existente con referencia a la zona y terrenos adyacentes a la mina. Se elaboró el mapa base de la zona para proceder a identificar la ubicación de los puntos de muestreo (Ver Apéndice 1 y 2), de los cuales se tomó las muestras correspondientes.

Fase de campo

Se construyeron calicatas en los ocho puntos de muestreo señalados en el mapa base, de donde fueron tomadas las 16 muestras de suelos, considerándose dos profundidades de 0 a 20 y 20 a 60 cm, las mismas que fueron depositadas en bolsas de polietileno, previa codificación según el número del punto de muestreo y las características físicas del lugar (Ver Apéndice 5). Las 16 muestras de suelos que fueron llevadas al laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agraria de la filial de Huaura para su respectivo secado y luego tamizado. Posteriormente dichas muestras fueron llevadas a Lima al Laboratorio de Biotecnología y Microbiología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (Ver Apéndice 5), para los análisis correspondientes.

Tabla 3

Puntos de muestreos

N° DE CALICATA	PROF. (cm)	LUGAR	ALTITUD (m.s.n.m.)	UTMs	
				Este	Norte
CA-01	0 -20 20 - 60	Contonga	4 090	271708	8948973
CA-02	0 -20 20 - 60	Contonga	4 030	271323	8948545
CA-03	0 -20 20 - 60	Contonga	4 160	271176	8948489
CA-04	0 -20 20 - 60	Contonga	4 150	270601	8948223
CA-05	0 -20 20 - 60	Contonga	4 015	270224	8948176
CA-06	0 -20 20 - 60	Contonga	4 050	270045	8948164
CA-07	0 -20 20 - 60	Contonga	4 120	270009	8947926
CA-08	0 -20 20 - 60	Contonga	3 900	268831	8947759

Fuente: Elaboración propia.

Fase de laboratorio

En esta fase las muestras colectadas en la fase de campo fueron analizadas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (Ver Apéndice 5), donde se determinó las siguientes características:

- a. pH del suelo, analizado por el Método del Potenciómetro.
- b. Conductividad eléctrica, determinada por el Método del Salómetro.
- c. Textura de suelo: porcentaje de arena, limo y arcilla, determinada por el Método Práctico (FAO, 2016)
- d. Materia orgánica, determinada por el Método de Calcinación.
- e. Salinidad, determinada por el Método del Salómetro.
- f. Capacidad de Intercambio Catiónico, determinada por el método de cloruro de calcio 1N pH 8.2

Además, mediante el método de la espectrofotometría se determinaron los contenidos de los metales pesados en estudio en base a los siguientes procedimientos:

a. Plomo (Pb) en mg.kg^{-1} de suelo.

Se preparó una solución líquida de la muestra de suelo a una temperatura de 15 – 35 °C, se añadió 8 ml de muestra a una cubeta de reacción (solución preparado por laboratorio especializado “OZ/PERÚ”), se adicionó 0,5 ml de del reactivo Pl-1 más 0,5 ml de solución Pl- 2. Dejándolo reposar 5 minutos (tiempo de reacción), posterior a ello se colocó la muestra en el fotómetro para la lectura de los resultados.

b. Cadmio (Cd) en mg.kg^{-1} de suelo

Se preparó una solución líquida de la muestra de suelo a una temperatura de 10 – 40 °C, se adicionó en una cubeta de reacción (solución preparado por laboratorio especializado “OZ/PERÚ”) 5,0 ml de muestra preparada y luego se añadió con una pipeta 0,20 ml de la solución Cd-1k, posterior a ello se le adicionó una microcuchara de Cd-2k y se agitó vigorosamente. Se dejó reposar por 2 minutos (tiempo de reacción) luego se colocó la muestra preparada en el fotómetro para la lectura respectivas.

c. Cromo (Cr) en mg.kg^{-1} de suelo.

Se preparó una solución líquida de la muestra de suelo a una temperatura de 15 – 35 °C, se añadió 10 ml de muestra de suelo a una cubeta de reacción (solución preparado por laboratorio especializado “OZ/PERÚ”) más 6 gotas de reactivo Cr-3k, se dejó en reposo por un minuto (tiempo de reacción) para luego realizar la medición en el fotómetro y obtener los resultados.

Fase de gabinete

En esta fase se ordenaron los resultados obtenidos en las fases de campo y de laboratorio para luego de tabularlos adecuadamente se interpretaron los contenidos de metales pesados que se encuentran en los diferentes puntos de muestreo, luego fueron analizados estadísticamente, se realizó la discusión de los resultados para culminar con la redacción del primer borrador de tesis, para su posterior sustentación.

Para la interpretación de los niveles de los metales pesados encontrado en la zona de estudio, se tuvo en cuenta la Tabla 4, donde se señalan los estándares de calidad ambiental para los suelos agrícolas, según lo ha determinado el MINAM (2017).

Tabla 4

Estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas, suelos de parques y suelos industriales

METALES PESADOS	UNIDADES DE MEDIDA	ESTÁNDARES DE PARA SUELOS AGRÍCOLAS
Cromo	mg. kg ⁻¹	0,4
Plomo	mg. kg ⁻¹	70,0
Cadmio	mg. kg ⁻¹	1,4

Fuente: Decreto Supremo N° 001-2017-MINAM

2.1.5. Identificación de las variables y su mensuración (metodología)

Las variables consideradas en la investigación fueron dos, la variable relacionada con cinco propiedades del suelo textura, materia orgánica, pH, salinidad y capacidad de intercambio catiónico) y la variable B consideró a los metales pesados (cadmio, plomo y cromo), tal como está señalado en la Tabla 5.

Tabla 5

Variables en estudio

VARIABLES	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO
Variable 1		
Propiedades del suelo:		
- Textura del suelo	Clase textural	Método práctico (FAO, 2016)
- Materia orgánica	g.kg ⁻¹	Método de calcinación
- Reacción el suelo	rangos de pH	Potenciómetro
- Salinidad	dS.m ⁻¹	Conductímetro
- Capacidad de intercambio catiónico	cmol(+).kg ⁻¹	Suma de cationes cambiables
Variable 2		
Niveles de metales pesados:		
- Contenido de Pb	mg.kg ⁻¹	Fotómetro (UCSS)
- Contenido de Cd	mg.kg ⁻¹	Fotómetro (UCSS)
- Contenido de Cr	mg.kg ⁻¹	Fotómetro (UCSS)

Fuente: Elaboración propia.

2.1.6. Análisis estadístico de las propiedades del suelo y el contenido de metales pesados

La comparación entre las medias de la presencia del metal pesado (Cd, Cr y Pb) y el porcentaje de arcilla, contenido de materia orgánica, rangos de pH, salinidad del suelo y capacidad de intercambio catiónico, se hicieron mediante el análisis de la regresión y la correlación simple (Little y Hills, 2002), utilizando el programa Minitab.

$$Y_1 = a + b_0X_1 + b_1X_2 + b_2X_3 + b_3X_4$$

$$Y_2 = a + b_0X_1 + b_1X_2 + b_2X_3 + b_3X_4$$

Donde:

Y_1 = Metal pesado (Pb, Cd o Cr) a la profundidad de 0-20 cm.

Y_2 = Metal pesado (Pb, Cd o Cr) a la profundidad de 20-60 cm.

X_1 : pH del suelo.

X_2 : Contenido de materia orgánica.

X_3 : Capacidad de intercambio catiónico

X_4 : Contenido de arcilla.

2.1.7. Materiales

Los materiales, reactivos e instrumentos utilizados durante el proceso de la investigación fueron los siguientes:

Materiales de campo

Lápiz y borrador, mapa base (croquis del lugar), fichas de codificación bolsas de plástico de 1 kg, GPS, reglas de un m, poncho de agua, guantes, cámara fotográfica, letreros. Calculadora, cinta métrica. Movilidad contratada.

Materiales de laboratorio

Test para en análisis de cadmio, plomo y cromo, muestras suelos agrícolas, jeringas, alcohol, calculadora, fotómetro (Espectrofotómetro), vasos de plástico descartables, algodón, probeta, rejilla, pipeta, micropipeta, placas de Petri, porta objetos, agitador magnético, matraces, embudos, pinzas, papel aluminio, papel filtro, guantes, mandil, mascarilla, vasos de vidrio, crisol de porcelana, balanza analítica, cápsula de porcelana, espátula de laboratorio, estufa de laboratorio, mortero, pH – metro, pinza de madera, pizeta de laboratorio, probeta graduada, rejilla de asbesto, vaso de precipitación, cuentagotas, escobilla de laboratorio, tamiz, cooler, cuaderno de apuntes, ácido nítrico, mufla, gasa, plumón indeleble, cinta métrica, agua destilada

Materiales de Gabinete

Computadora, impresoras, escáner, USB, programas *estadísticos* (*Excel, word, power point, Minitab*)

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Resultados del análisis de los suelos de Antamina

3.1.1. Resultados de la caracterización de los suelos en estudio se presentan en las siguientes tablas:

a. Resultados de la reacción del suelo (pH) y de la conductividad eléctrica (salinidad)

Los resultados del análisis del pH y la conductividad eléctrica están mostrados en la Tabla 6, donde se observa claramente que el pH encontrado en los ocho puntos de muestreo son variables adquiriendo valores que van desde 4,1 (suelos extremadamente ácidos) hasta 5,9 (Suelos moderadamente ácidos). Del mismo modo los resultados con respecto a la salinidad indican que esta propiedad del suelo se encuentra en niveles bajos ($< 1 \text{ dS.m}^{-1}$), indicando que no existen problemas por la salinidad de los suelos. La Figura 6 muestra el diagrama de cajas del pH con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 4,80; el percentil 75 es 5,18 y el percentil 25 es 4,40; el límite superior es 5,30 y el límite inferior es 4,10. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 5,30; el percentil 75 es 5,78 y el percentil 25 es 4,80; el límite superior es 5,90 y el límite inferior es 4,70.

Tabla 6

pH y conductividad eléctrica

Nº TRAT.	PROF. (cm)	pH	C.E. (dS.m^{-1})
CA-01	0-20	5,2	0,45
	20-60	5,7	0,41
CA-02	0-20	5,1	0,33
	20-60	5,7	0,39

Continuación

CA-03	0-20	5,3	0,37
	20-60	5,8	0,37
CA-04	0-20	4,6	0,47
	20-60	4,8	0,58
CA-05	0-20	4,4	0,48
	20-60	4,7	0,47
CA-06	0-30	4,1	0,39
	20-60	4,8	0,58
CA-07	0-20	5,0	0,47
	20-60	5,9	0,52
CA-08	0-20	4,4	0,47
	20-60	4,9	0,56

Fuente: *Elaboración propia.*

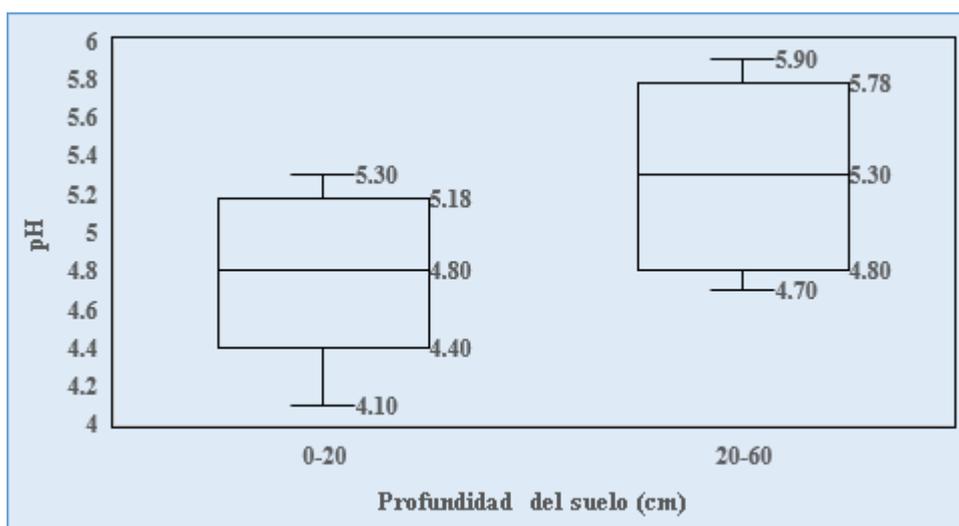


Figura 6. Diagrama de caja, para el pH del suelo a dos profundidades. Fuente: *Elaboración propia.*

b. Resultados del análisis textural de los suelos

La textura de los suelos en estudio fue determinada en el Laboratorio de Biotecnología y Microbiología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, mediante el método práctico sugerido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2016). Tal como se muestra en la Tabla 7, la textura varía de suelos franco arenosos

(textura moderadamente gruesa) y suelos franco areno arcilloso (textura media). La Figura 7 muestra el diagrama de cajas del contenido de arcilla con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 23,50 %; el límite superior es 32,00 % y el límite inferior es 14,00 %; el percentil 75 es 29,00 % y el percentil 25 es 18,50 %. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 20,50 %; el percentil 75 es 24,25 % y el percentil 25 es 13,50 %; el límite superior es 30,00 % y el límite inferior es 11,00 %.

Tabla 7

Textura y clase textural

N° TRAT.	PROF. (cm)	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		Arena %	Limo %	Arcilla %	
CA-01	0-20	52	23	25	Franco areno arcilloso
	20-60	50	20	30	Franco areno arcilloso
CA-02	0-20	68	12	20	Franco arenoso
	20-60	55	25	20	Franco areno arcilloso
CA-03	0-20	58	16	26	Franco arenoso
	20-60	61	14	25	Franco areno arcilloso
CA-04	0-20	66	16	18	Franco arenoso
	20-60	65	23	12	Franco arenoso
CA-05	0-20	57	11	32	Franco areno arcilloso
	20-60	61	28	11	Franco arenoso
CA-06	0-20	63	23	14	Franco arenoso
	20-60	68	14	18	Franco arenoso
CA-07	0-20	66	12	22	Franco areno arcilloso
	20-60	63	15	22	Franco areno arcilloso
CA-08	0-20	65	15	30	Franco areno arcilloso
	20-60	53	26	21	Franco areno arcilloso

Fuente: Elaboración propia.

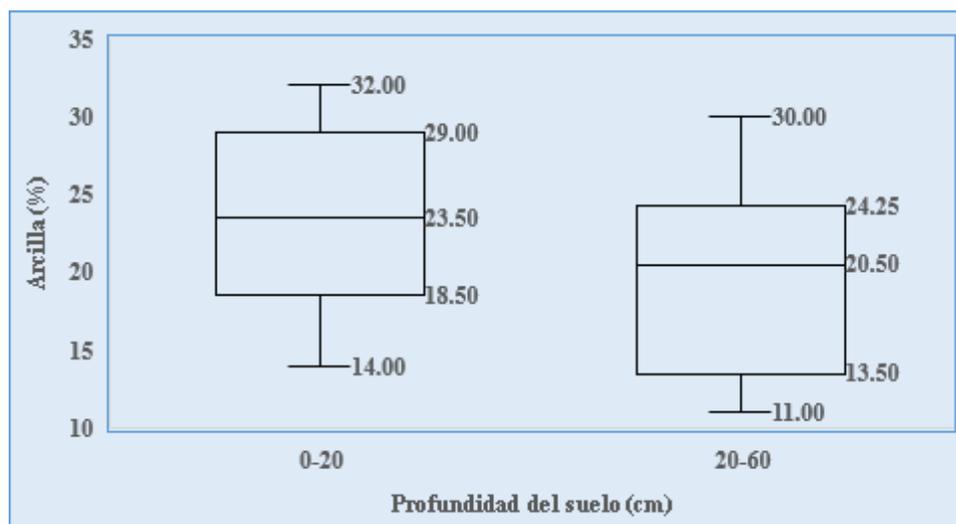


Figura 7. Diagrama de caja para el contenido de arcilla (%) del suelo a dos profundidades.
Fuente: Elaboración propia.

c. Análisis de la materia orgánica y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Los resultados de los análisis del contenido de materia orgánica y de la capacidad de intercambio catiónico se muestran en la Tabla 8. Los contenidos de materia orgánica son variables encontrándose suelos contenidos altos (<4 %), contenidos medios (de 2 a 4 %) y contenidos bajos (< 1 %). Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico es variable con resultados que van desde 12,23 cmol(+).kg⁻¹ considerados como moderadamente alta (12 a 20 cmol(+).kg⁻¹ a más de 20 cmol(+).kg⁻¹ indicando suelos altos en CIC. La Figura 8 muestra el diagrama de cajas del contenido de materia orgánica con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 2,67 %; el límite superior es 4,79 % y el límite inferior es 1,96 %; el percentil 75 es 6,09 % y el percentil 25 es 1,65 %. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 1,65 %. El percentil 75 es 1,99 % y el percentil 25 es 1,25 %; el límite superior es 1,99 % y el límite inferior es 0,78 %. Del mismo modo en la Figura 9 se muestra el diagrama de cajas del contenido de materia orgánica con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 19,85 cmol.kg⁻¹; el límite superior es 31,00 cmol.kg⁻¹ y el límite inferior es 12,23 cmol.kg⁻¹; el percentil 75 es 26,75 cmol.kg⁻¹ y el percentil 25 es 15,22 cmol.kg⁻¹. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 17,39 cmol.kg⁻¹; el percentil 75 es 20,10 cmol.kg⁻¹ y el percentil 25 es 15,17 cmol.kg⁻¹. El límite superior es 23,20 cmol.kg⁻¹ y el límite inferior es 14,13 cmol.kg⁻¹.

Tabla 8

Materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico

Nº TRAT.	PROFUNDIDAD (cm)	MATERIA ORGÁNICA (%)	CIC cmol(+).kg ⁻¹
CA-01	0 - 20	5,25	28,56
	20 - 60	2,03	23,20
CA-02	0 - 20	2,10	21,30
	20 - 60	1,53	20,40
CA-03	0 - 20	6,09	31,00
	20 - 60	1,86	19,18
CA-04	0 - 20	3,41	21,00
	20 - 60	1,38	19,12
CA-05	0 - 20	2,22	17,20
	20 - 60	1,76	15,15
CA-06	0 - 20	3,12	18,70
	20 - 60	2,79	15,23
CA-07	0 - 20	1,65	12,23
	20 - 60	1,21	15,60
CA-08	0 - 20	1,91	14,56
	20 - 60	0,78	14,13

Fuente: Elaboración propia.

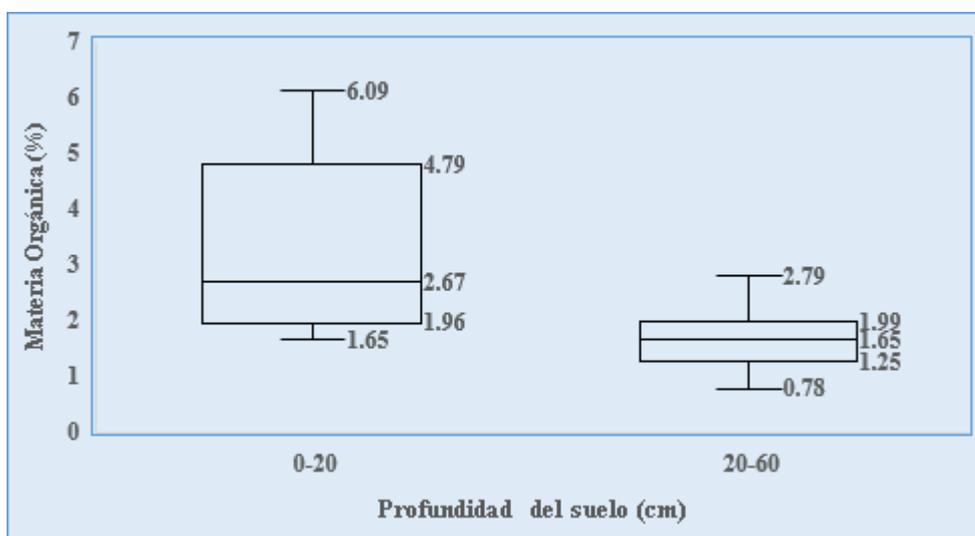


Figura 8. Diagrama de caja para el contenido de MO en el suelo a dos profundidades.

Fuente: Elaboración propia.

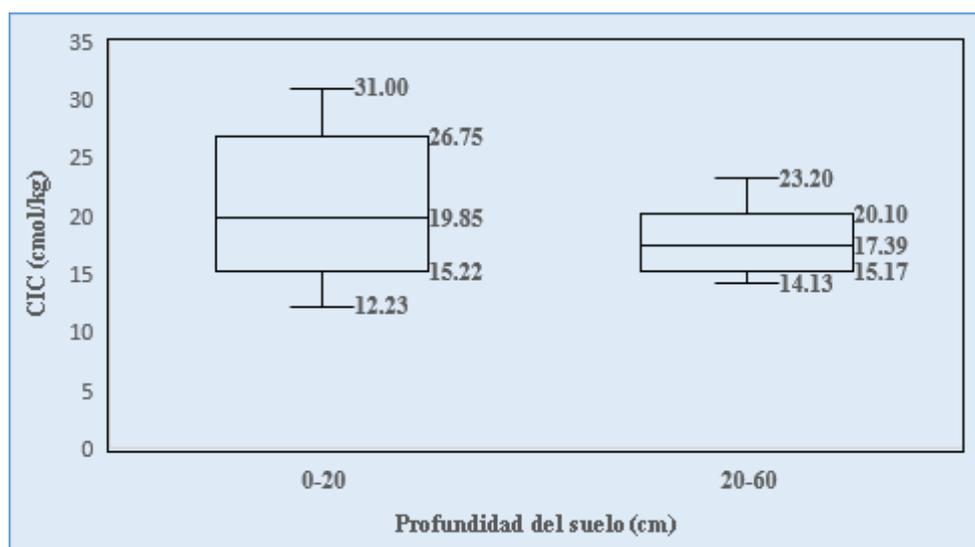


Figura 9. Diagrama de caja para la CIC en el suelo a dos profundidades. Fuente: Elaboración propia

3.2. Resultados del análisis de los elementos pesados de los suelos en estudio

Los análisis de los niveles de cadmio, cromo y plomo contenidos en los suelos, cuyos resultados obtenidos por el Método del Fotómetro, se muestran en la Tabla 9. Se observa que el cadmio, plomo y cromo están presente en los suelos estudiados con valores que sobrepasan el límite permisible señalado por el MINAM (2017).

Los valores de los metales pesados encontrados en l investigación fueron los siguientes:

- (a) Cadmio: Este metal está presente en los suelos en estudio con niveles muy variables desde 7,25 hasta 19,90 mg.kg^{-1} (ambas profundidades), valores que sobrepasan los límites máximos permisibles que señalado por el MINAM (2017).
- (b) Plomo: Este metal está presente en los suelos en estudio con niveles muy variables desde 56,0 hasta 129,0 mg.kg^{-1} , con excepción de la calicata 07 que tiene de 56,0 (0-20 cm) a 65,0 mg.kg^{-1} (20-60), valores que sobrepasan los límites máximos permisibles que señalado por el MINAM (2017) que es de 70 mg.kg^{-1} .
- (c) Cromo: Este metal está presente en los suelos en estudio con niveles variables desde 14,5 hasta 44,5 mg.kg^{-1} (ambas profundidades), valores que sobrepasan

significativamente los límites máximos permisibles que señalado por el MINAM (2017) que es de 0,4 mg.kg⁻¹.

Tabla 9

Contenido de elementos menores

Nº TRAT.	CADMIO (mg.kg⁻¹)	CROMO (mg.kg⁻¹)	PLOMO (mg.kg⁻¹)
CA-01	8,75	27,0	101,0
	12,15	26,5	90,0
CA-02	7,90	44,5	91,5
	8,85	26,5	86,5
CA-03	12,05	26,5	89,0
	15,80	23,0	76,0
CA-04	19,90	23,0	123,5
	19,10	20,0	117,0
CA-05	15,90	29,0	129,0
	17,85	24,5	100,0
CA-06	16,85	26,5	81,5
	19,20	24,0	71,0
CA-07	7,25	20,5	56,0
	8,45	14,5	65,0
CA-08	13,45	20,5	98,5
	15,35	15,5	73,5

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 muestra el diagrama de cajas del contenido de plomo con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 95,00 mg Pb.kg⁻¹; el percentil 75 es 117,88 mg Pb.kg⁻¹ y el percentil 25 es 83,38 mg Pb.kg⁻¹; el límite superior es 129,0 mg Pb.kg⁻¹ y el límite inferior es 56,00 mg Pb.kg⁻¹. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 81,25 mg Pb.kg⁻¹; el percentil 75 es 97,50 mg Pb.kg⁻¹ y el percentil 25 es 71,63 mg Pb.kg⁻¹; el límite superior es 117,00 mg Pb.kg⁻¹ y el límite inferior es 65,00 mg Pb.kg⁻¹.

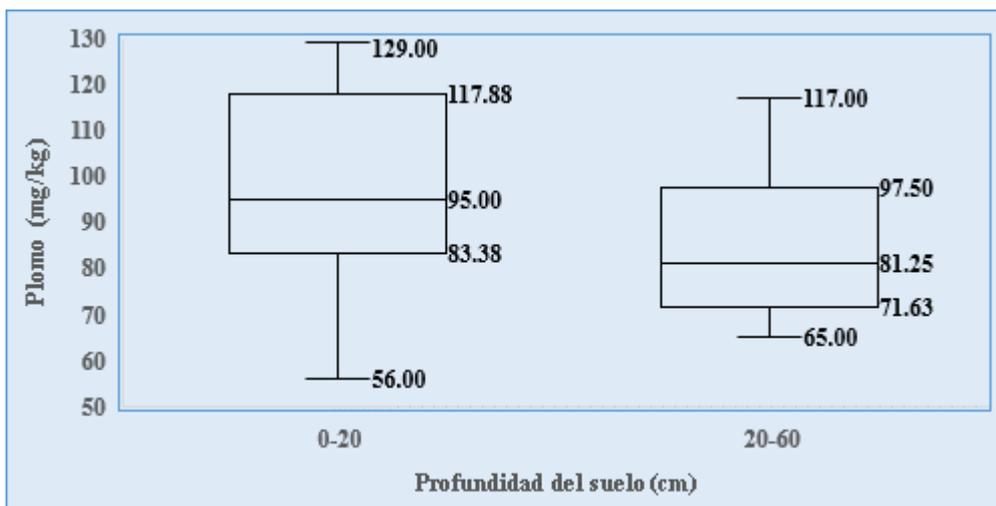


Figura 10. Diagrama de caja para el contenido de Pb en el suelo a dos profundidades.
Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo en la Figura 11 se muestra el diagrama de cajas del contenido de cadmio con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 12,75 mg Cd.kg⁻¹; el límite superior es 18,90 mg Cd.kg⁻¹ y el límite inferior es 7,25 mg Cd.kg⁻¹; el percentil 75 es 16,61 mg Cd.kg⁻¹ y el percentil 25 es 8,11 mg Cd.kg⁻¹. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 15,80 mg Cd.kg⁻¹; el percentil 75 es 18,79 mg Cd.kg⁻¹ y el percentil 25 es 9,68 mg Cd.kg⁻¹; el límite superior es 19,20 mg Cd.kg⁻¹ y el límite inferior es 8,45 mg Cd.kg⁻¹

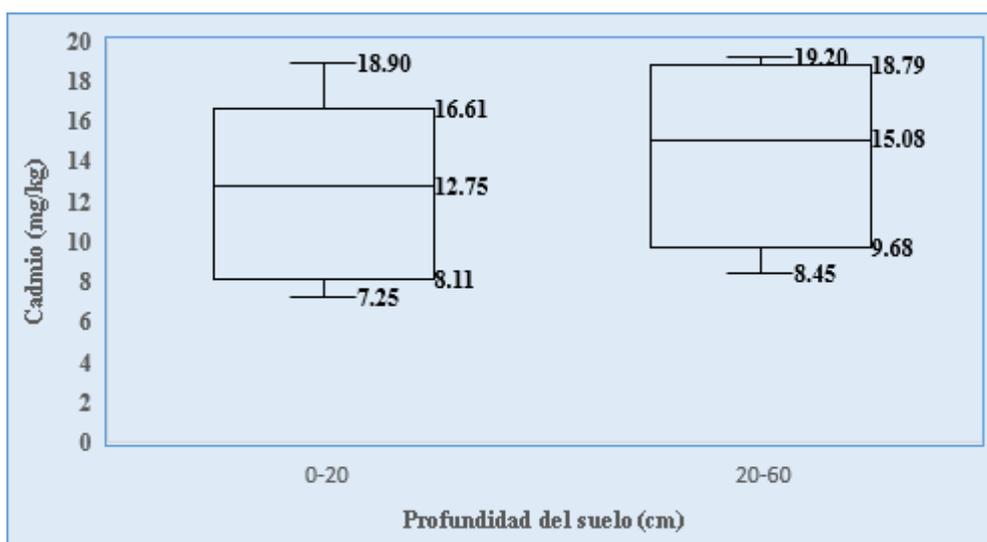


Figura 11. Diagrama de caja para el contenido de Cd en el suelo a dos profundidades.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se muestra el diagrama de cajas del contenido de cromo con relación a la profundidad de 0 a 20 cm, donde se observa que la mediana es igual a 26,50 Cr.kg⁻¹; el límite superior es 29,0 Cr.kg⁻¹ y el límite inferior es 20,50 mg Cr.kg⁻¹; el percentil 75 es 29,00 mg Cr.kg⁻¹ y el percentil 25 es 21,13 mg Cr.kg⁻¹. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 23,50 mg Cr.kg⁻¹; el percentil 75 es 26,0 mg Cr.kg⁻¹ y el percentil 25 es 16,63 mg Cr.kg⁻¹; el límite superior es 26,50 mg Cr.kg⁻¹ y el límite inferior es 14,50 mg Cr.kg⁻¹. El dato máximo superior atípico en la profundidad de 0 a 20 cm, es de 44,50 mg Cr.kg⁻¹.

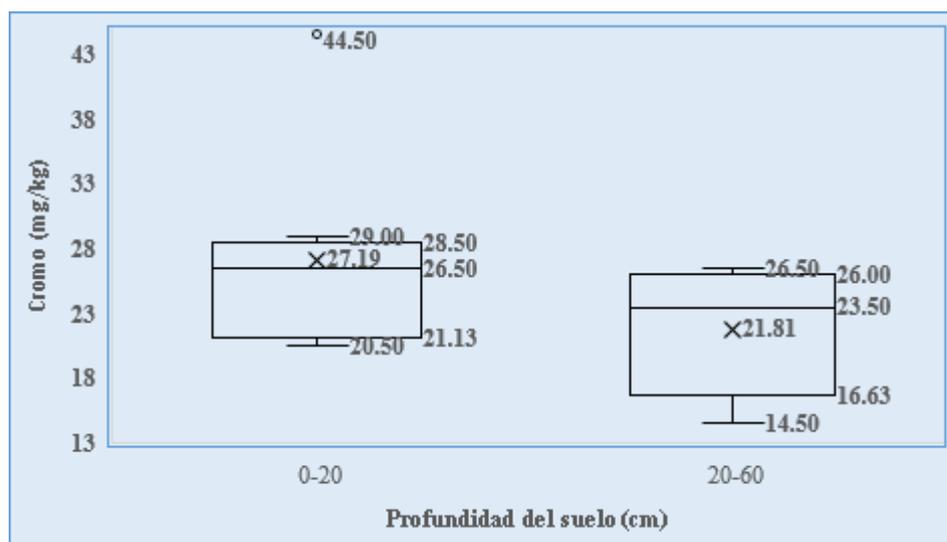


Figura 12. Diagrama de caja, para el contenido de Cr en el suelo a dos profundidades.
Fuente: Elaboración propia

3.3. Resultados de los análisis de los elementos pesados y las propiedades del suelo

3.3.1. Resultados del contenido de metales pesados en relación con el pH de los suelos

Los resultados de la comparación de entre las propiedades del suelo (pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de arcilla) en las dos profundidades y las medias de los contenidos de plomo cadmio y cromo en los suelos en estudio, están mostrados en las siguientes tablas y figuras, de la siguiente manera:

a. Contenido de plomo en relación con el pH del suelo

La Tabla 10 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el pH de los suelos muestreados y el contenido de plomo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 10

Estadísticos del contenido de Pb y valores de pH a las profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Pb (mg.kg ⁻¹)	pH	Pb (mg.kg ⁻¹)	pH
CA-01	101,00	5,20	90,00	5,70
CA-02	91,50	5,10	86,50	5,70
CA-03	89,00	5,30	76,00	5,80
CA-04	123,50	4,60	117,00	4,80
CA-05	129,00	4,40	100,00	4,70
CA-06	81,50	4,10	71,00	4,80
CA-07	56,00	5,00	65,00	5,90
CA-08	98,50	4,40	73,50	4,90
Promedio	96,25	4,76	84,88	5,29
S	23,16	0,44	17,26	0,53
CV	24,06	9,32	20,34	9,98

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo una significativa influencia alguna sobre el contenido de plomo (Tabla 11). La Figura 13 muestra que la relación entre el pH y el contenido de plomo es positiva e inversa ya que al incrementarse el pH el contenido de plomo disminuye.

Tabla 11

Análisis de regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	299,623	299,623	0,520	0,498 ns
Error	6	3455,877	575,979		
Total	7	3755,500			

$r = 0,282$ ns $r^2 = 0,080$ $Pb_{20} = 166,457 - 14,742 (pH_{20})$

Fuente: Elaboración propia.

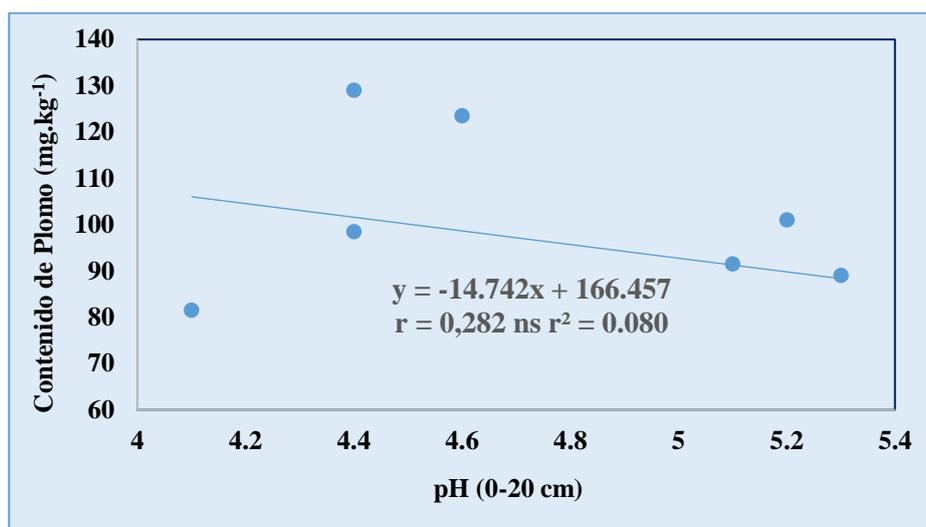


Figura 13. Regresión y correlación del pH y contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia significativa sobre el contenido de plomo (Tabla 12). La Figura 14 muestra que la relación entre el pH y el contenido de plomo a nivel de 20 a 60 cm de profundidad también es positiva e inversa ya que al incrementarse el pH el contenido de plomo disminuye.

Tabla 12

Análisis de regresión entre el pH y el contenido de plomo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	382,795	382,795	1,349	0,290 ns
Error	6	1702,580	283,763		
Total	7	2085,375			

$r = 0,428$ ns $r^2 = 0,184$ $Pb_{60} = 158,981 - 14,015 (pH_{60})$. Fuente: Elaboración propia

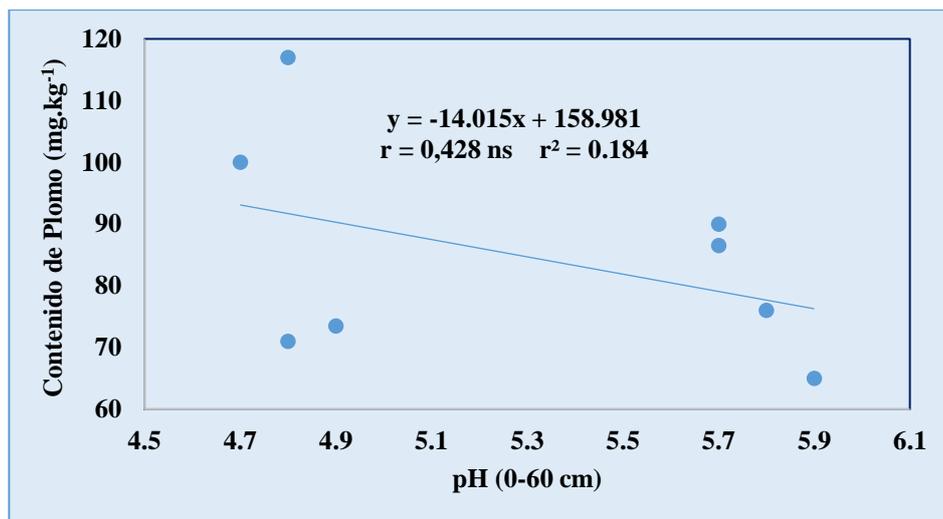


Figura 14. Regresión y correlación del pH y contenido de plomo en las profundidades 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia.

b. Contenido de cadmio en relación con el pH del suelo

La siguiente Tabla 13 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el pH de los suelos muestreados y el contenido de cadmio en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 13

Estadísticos del contenido de Cd y el pH a dos profundidades de suelo: 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cd (mg.kg ⁻¹)	pH	Cd (mg.kg ⁻¹)	pH
CA-01	8,75	5,20	12,15	5,70
CA-02	7,90	5,10	8,85	5,70
CA-03	12,05	5,30	15,80	5,80
CA-04	18,90	4,60	19,10	4,80
CA-05	15,90	4,40	17,85	4,70
CA-06	16,85	4,10	19,20	4,80
CA-07	7,25	5,0	8,45	5,90
CA-08	13,45	4,40	15,35	4,90
Promedio	12,63	4,76	14,59	5,29
S	4,39	0,44	4,32	0,53
CV	34,79	9,32	29,63	9,98

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el pH y el contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm mostró significación estadística indicando que el pH tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 14). La Figura 15 muestra que la relación entre el pH y el contenido de cadmio es positiva e inversa ya que al incrementarse el pH el contenido de cadmio disminuye.

Tabla 14

Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cadmio en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	75,173	75,173	7,515	0,034 *
Error	6	60,021	10,004		
Total	7	135,195			

$r = 0,746 *$ $r^2 = 0,556$ $Cd_{20} = 47,797 - 7,384(pH_{20})$ *Fuente: Elaboración propia*

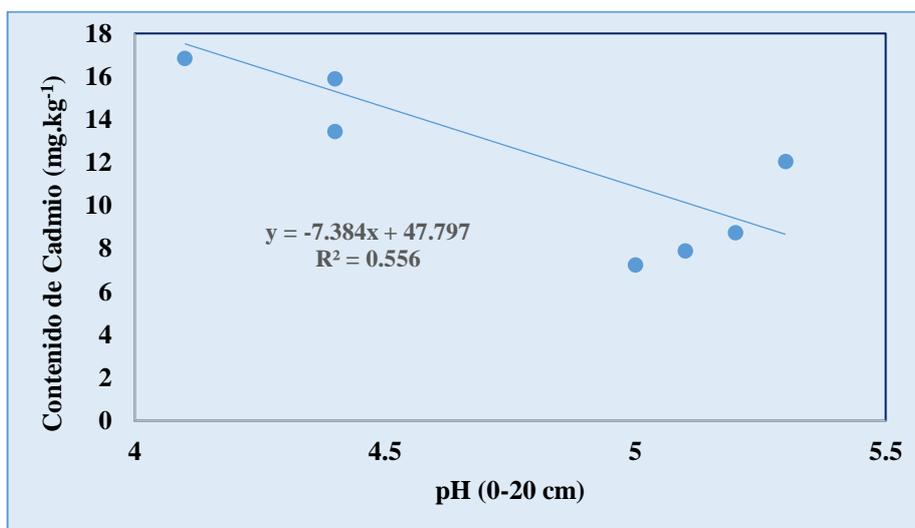


Figura 15. Regresión y correlación del pH y contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior, el análisis de la regresión entre el pH y el contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm mostró significación estadística indicando que el pH tiene una marcada influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 15). La Figura 16 muestra que la relación entre el pH y el contenido de cadmio es positiva e inversa ya que al incrementarse el pH el contenido de cadmio disminuye.

Tabla 15

Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cadmio en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	89,014	89,014	12,762	0,012*
Error	6	41,849	6,975		
Total	7	130,862			

$r = 0,825$ $r^2 = 0,680$ $Cd_{60} = 50,329 - 6,758 (pH_{60})$ *Fuente: Elaboración propia*

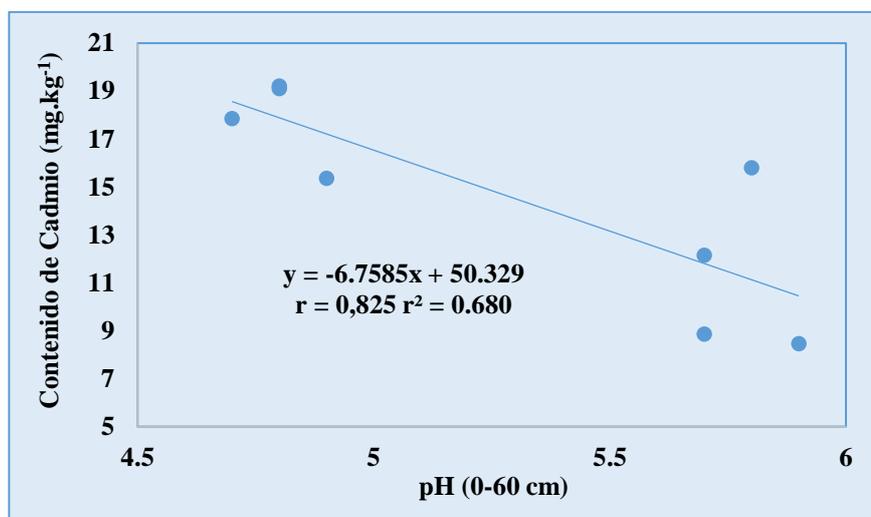


Figura 16. Regresión y correlación del pH y contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

c. Contenido de cromo en relación con el pH del suelo

La Tabla 16 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el pH de los suelos muestreados y el contenido de cromo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 16

Estadísticos del contenido de Cr y el pH a dos profundidades de suelo: 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cr (mg.kg ⁻¹)	pH	Cr (mg.kg ⁻¹)	pH
CA-01	27,00	5,20	26,50	5,70
CA-02	44,50	5,10	26,50	5,70
CA-03	26,50	5,30	23,00	5,80
CA-04	23,00	4,60	20,00	4,80
CA-05	29,00	4,40	24,50	4,70
CA-06	26,50	4,10	24,00	4,80
CA-07	20,50	5,0	14,50	5,90
CA-08	20,50	4,40	15,50	4,90
Promedio	27,19	4,76	21,81	5,29
S	7,66	0,44	4,69	0,53
CV	28,18	9,32	21,50	9,98

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el pH y el contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 17). La Figura 17 muestra que la relación entre el pH y el contenido de cromo es positiva y ascendente ya que al incrementarse el pH el contenido de cromo aumenta.

Tabla 17

Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cromo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	32,619	32,619	0,517	0,499 ns
Error	6	378,350	63,058		
Total	7	410,969			

$r = 0,282$ ns $r^2 = 0,079$ $Cd_{20} = 4,023 - 4,864$ (pH₂₀) Fuente: Elaboración propia

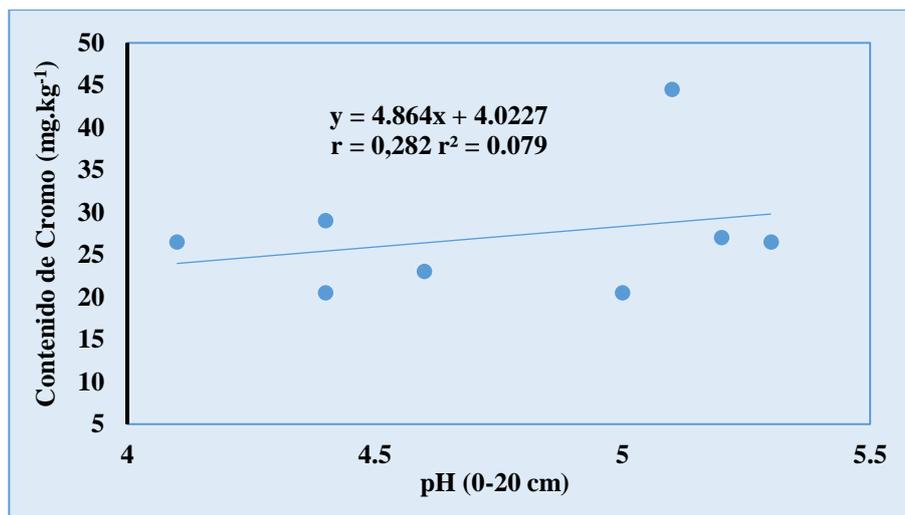


Figura 17. Regresión y correlación del pH y contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el pH y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 18). La Figura 18 muestra que la relación entre el pH y el contenido de cromo es ligeramente positiva y ascendente ya que al incrementarse el pH el contenido de cromo aumenta.

Tabla 18

Análisis de regresión entre el pH y el contenido de cromo en la profundidad 20-60 cm.

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	0,238	0,238	0,009	0,926 ns
Error	6	153,731	25,622		
Total	7	153,969			

$r = 0,039$ ns $r^2 = 0,002$ $Cr_{60} = 19,964 + 0,350 (pH_{60})$ Fuente: Elaboración propia

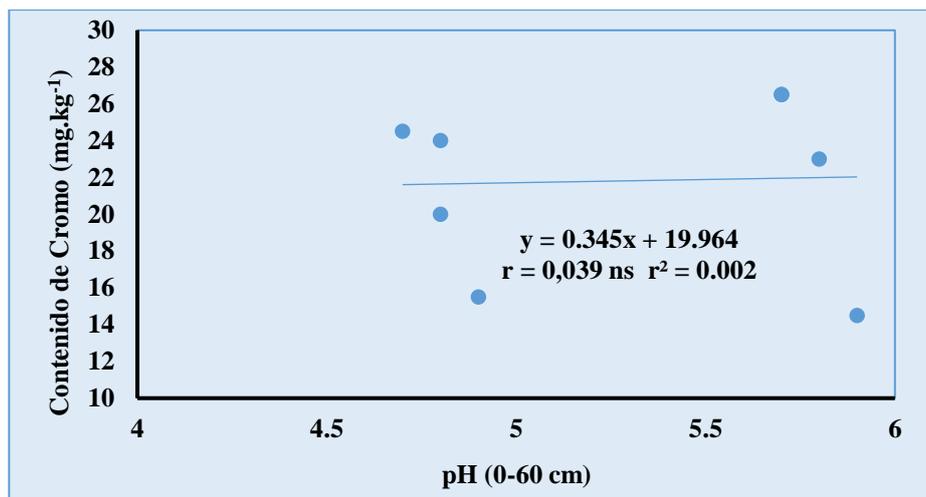


Figura 18. Regresión y correlación del pH y contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Resultados del contenido de metales pesados en relación con la materia orgánica

a. Contenido de plomo en relación con la materia orgánica del suelo

La Tabla 19 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el contenido de materia orgánica en los suelos en estudio y el contenido de plomo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 19

Estadísticos del contenido de Pb y de MO a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Pb (mg.kg ⁻¹)	MO (%)	Pb (mg.kg ⁻¹)	MO (%)
CA-01	101,00	5,25	90,00	2,03
CA-02	91,50	2,10	86,50	1,53
CA-03	89,00	6,09	76,00	1,86
CA-04	123,50	3,41	117,00	1,38
CA-05	129,00	2,22	100,00	1,76
CA-06	81,50	3,12	71,00	2,79
CA-07	56,00	1,65	65,00	1,21
CA-08	98,50	1,91	73,50	0,78
Promedio	96,25	3,22	84,88	1,67
S	23,16	1,64	17,26	0,60
CV	24,06	50,97	20,34	36,09

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la materia orgánica y el contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que la materia orgánica no tuvo influencia sobre el contenido de plomo (Tabla 20). La Figura 19 muestra que la relación entre la MO y el contenido de plomo es positiva y ligeramente ascendente ya que al incrementarse la MO el contenido de plomo aumenta.

Tabla 20

Análisis de regresión entre los contenidos de MO y de plomo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	42,519	42,519	0,069	0,802 ns
Error	6	3712,981	618,830		
Total	7	3755,500			

$r = 0,106$ ns $r^2 = 0,011$ $Pb_{20} = 91,414 + 1,502 (MO_{20})$ Fuente: Elaboración propia

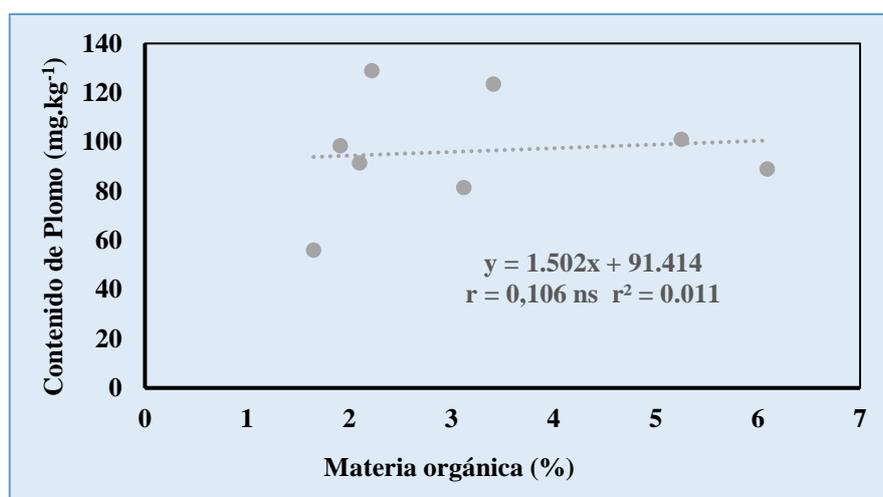


Figura 19. Regresión y correlación de la MO y contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la regresión entre la materia orgánica y el contenido de plomo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que la materia orgánica no tuvo influencia sobre el contenido de plomo (Tabla 21). La Figura 20 muestra que la relación entre la MO y el contenido de plomo es inversa y ligeramente descendente ya que al incrementarse la MO el contenido de plomo disminuye muy ligeramente.

Tabla 21

Análisis de regresión entre contenidos de MO y de plomo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	7,284	7,284	0,021	0,889 ns
Error	6	2078,091	346,349		
Total	7	2085,375			

$r = 0,059$ ns $r^2 = 0,003$ $Pb_{60} = 87,701 - 1,695 (MO_{60})$ Fuente: Elaboración propia

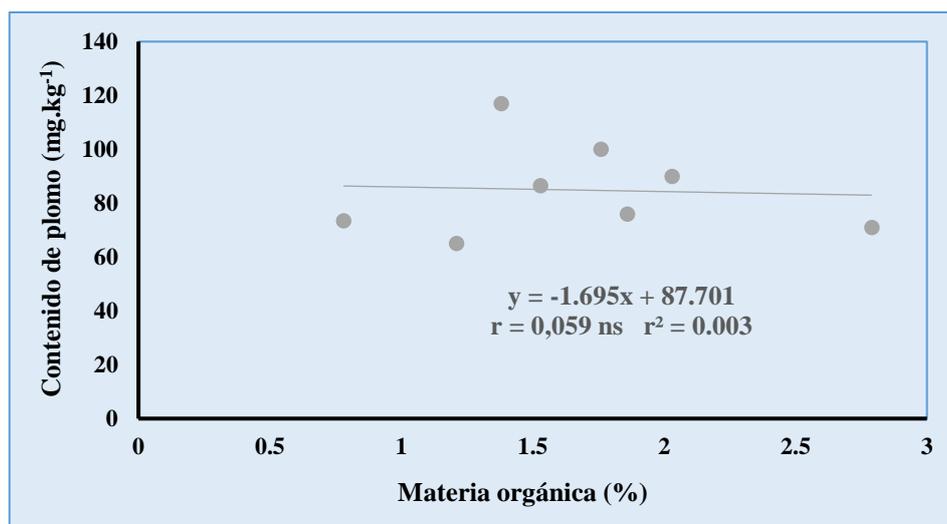


Figura 20. Regresión y correlación de MO y contenido de plomo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

b. Contenido de cadmio en relación con la materia orgánica del suelo

La Tabla 22 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre la MO de los suelos muestreados y el contenido de cadmio en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 22

Estadísticos de los contenidos de Cd y de MO a dos profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cd (mg.kg ⁻¹)	MO (%)	Cd (mg.kg ⁻¹)	MO (%)
CA-01	8,75	5,25	12,15	2,03
CA-02	7,90	2,10	8,85	1,53

Continuación

CA-03	12,05	6,09	15,80	1,86
CA-04	18,90	3,41	19,10	1,38
CA-05	15,90	2,22	17,85	1,76
CA-06	16,85	3,12	19,20	2,79
CA-07	7,25	1,65	8,45	1,21
CA-08	13,45	1,91	15,35	0,78
Promedio	12,63	3,22	14,59	1,67
S	4,39	1,64	4,32	0,60
CV	34,79	50,97	29,63	36,09

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el contenido de materia orgánica y el contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que la MO no tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 23). La Figura 21 muestra que la relación entre la MO y el contenido de cadmio es muy ligeramente inversa ya que al incrementarse el pH el contenido de cadmio aumenta muy ligeramente.

Tabla 23

Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cadmio en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	0,021	0,021	0,001	0,977 ns
Error	6	135,174	22,529		
Total	7	135,195			

$r = 0,012$ ns $r^2 = 0,000$

$Cd_{20} = 12,524 - 0,033 (MO_{20})$

Fuente: Elaboración propia.

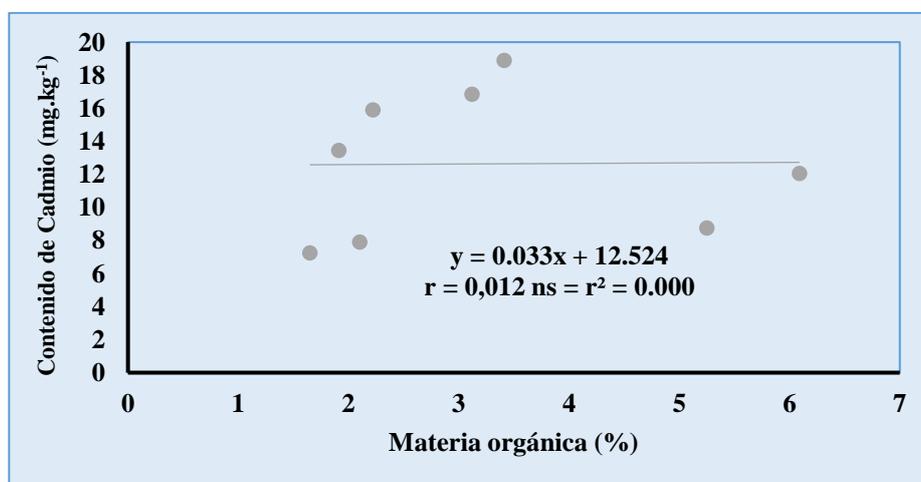


Figura 21. Regresión y correlación de la MO y contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el contenido de materia orgánica y el contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm tampoco mostró significación estadística indicando que la MO no tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 24). La Figura 22 muestra que la relación entre la MO y el contenido de cadmio es positiva y ascendente ya que al incrementarse el pH el contenido de cadmio aumenta.

Tabla 24

Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cadmio en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	16,417	16,417	0,861	0,389 ns
Error	6	114,445	19,074		
Total	7	130,862			

$r = 0,354$ ns $r^2 = 0,125$ $Cd_{60} = 10,351 - 2,545 (MO_{60})$ Fuente: Elaboración propia

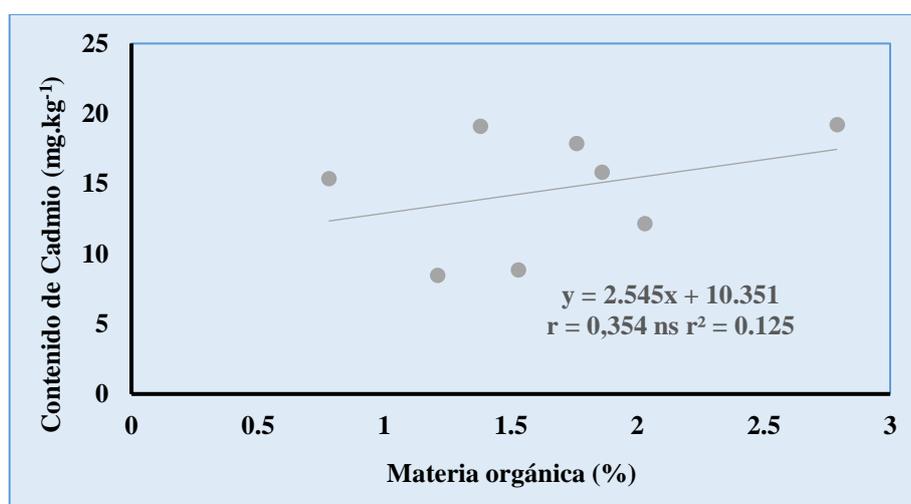


Figura 22. Regresión y correlación de la MO y contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

c. Contenido de cromo en relación con la materia orgánica del suelo

La Tabla 25 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el contenido de materia orgánica de los suelos muestreados y el contenido de cromo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 25

Estadísticos del contenido de Cr y de MO a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cr (mg.kg ⁻¹)	MO (%)	Cr (mg.kg ⁻¹)	MO (%)
CA-01	27,00	5,25	26,50	2,03
CA-02	44,50	2,10	26,50	1,53
CA-03	26,50	6,09	23,00	1,86
CA-04	23,00	3,41	20,00	1,38
CA-05	29,00	2,22	24,50	1,76
CA-06	26,50	3,12	24,00	2,79
CA-07	20,50	1,65	14,50	1,21
CA-08	20,50	1,91	15,50	0,78
Promedio	27,19	3,22	21,81	1,67
S	7,66	1,64	4,69	0,60
CV	28,18	50,97	21,50	36,09

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el contenido de materia orgánica y el contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia significativa sobre el contenido de cromo (Tabla 26). La Figura 23 muestra que la relación entre la materia orgánica y el contenido de cromo es inversa ya que al incrementarse la MO el contenido de cromo disminuye.

Tabla 26

Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cromo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	1,339	1,399	0,020	0,893 ns
Error	6	409,629	68,272		
Total	7	410,969			

$r = 0,057$ ns $r^2 = 0,003$ $Cr_{20} = 28,046 - 0,267 (MO_{20})$ Fuente: Elaboración propia

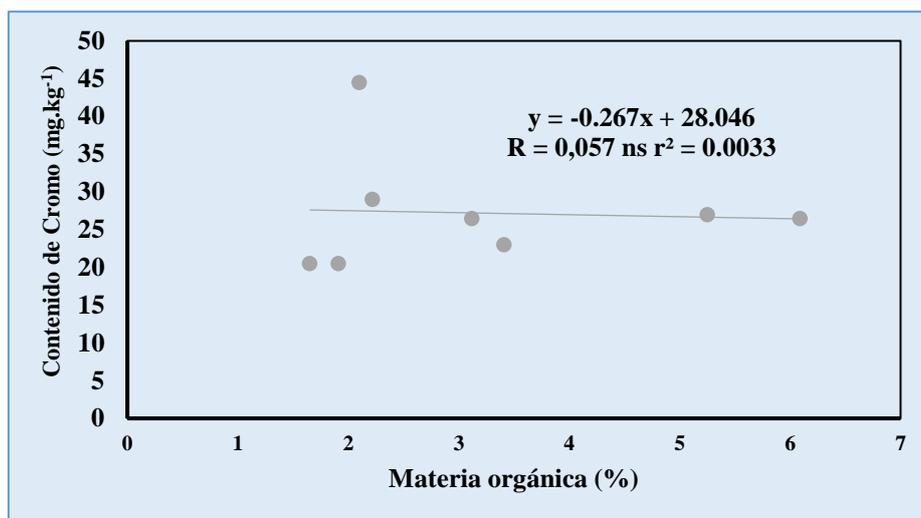


Figura 23. Regresión y correlación de la MO y contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre el contenido de materia orgánica y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 27). La Figura 24 muestra que la relación entre la materia orgánica y el contenido de cromo es positiva y ascendente ya que al incrementarse la MO el contenido de cromo aumenta.

Tabla 27

Análisis de regresión entre la MO y el contenido de cromo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	71,413	71,413	5,190	0,063 ns
Error	6	82,556	13,759		
Total	7	153,969			

$r = 0,681$ ns $r^2 = 0,464$ $Cr_{60} = 12,963 + 5,307 (MO_{60})$ Fuente: Elaboración propia

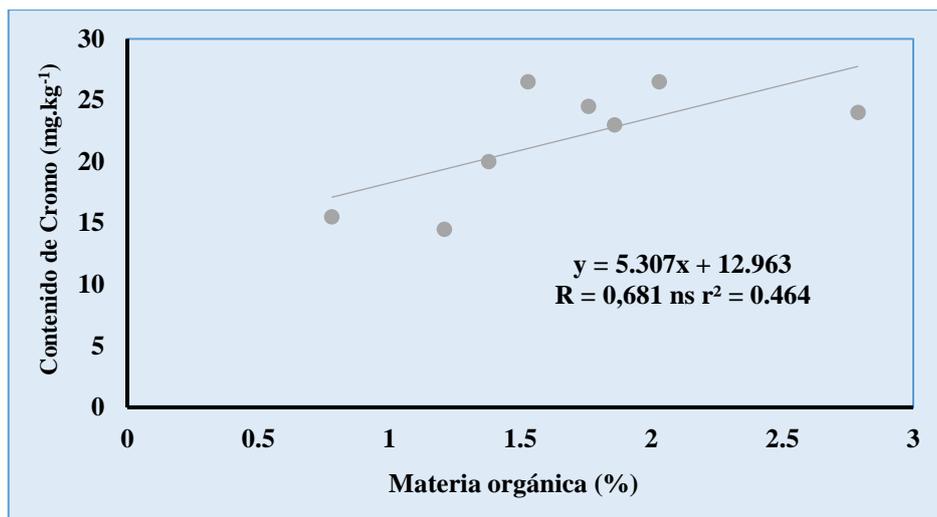


Figura 24. Regresión y correlación de la MO y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Resultados del contenido de los metales pesados en relación CIC

a. Contenido de plomo en relación con la capacidad de intercambio catiónico

La Tabla 28 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para analizar la relación que existe entre el contenido de materia orgánica de los suelos y el contenido de plomo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 28

Estadísticos del contenido de Pb y de CIC a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Pb (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol(+).kg ⁻¹)	Pb (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol(+).kg ⁻¹)
CA-01	101,00	28,56	90,00	23,20
CA-02	91,50	21,30	86,50	20,40
CA-03	89,00	31,00	76,00	19,18
CA-04	123,50	21,00	117,00	19,18
CA-05	129,00	17,20	100,00	15,15
CA-06	81,50	18,70	71,00	15,23
CA-07	56,00	12,23	65,00	15,60
CA-08	98,50	14,56	73,50	14,13

Continuación

Promedio	96,25	20,57	84,88	17,75
S	23,16	6,48	17,26	3,20
CV	24,06	31,50	20,34	18,00

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre a capacidad de intercambio catiónico y el contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que la CIC no tuvo influencia sobre el contenido de plomo (Tabla 29). La Figura 25 muestra que la relación entre la CIC y el contenido de plomo es positiva y ascendente ya que al incrementarse la CIC el contenido de plomo aumenta.

Tabla 29

Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de plomo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	150,012	150,012	0,250	0,635 ns
Error	6	3605,488	600,915		
Total	7	3755,500			

$r = 0,200$ ns $r^2 = 0,040$ $Pb_{20} = 81,554 + 0,714 (CIC_{20})$ Fuente: Elaboración propia

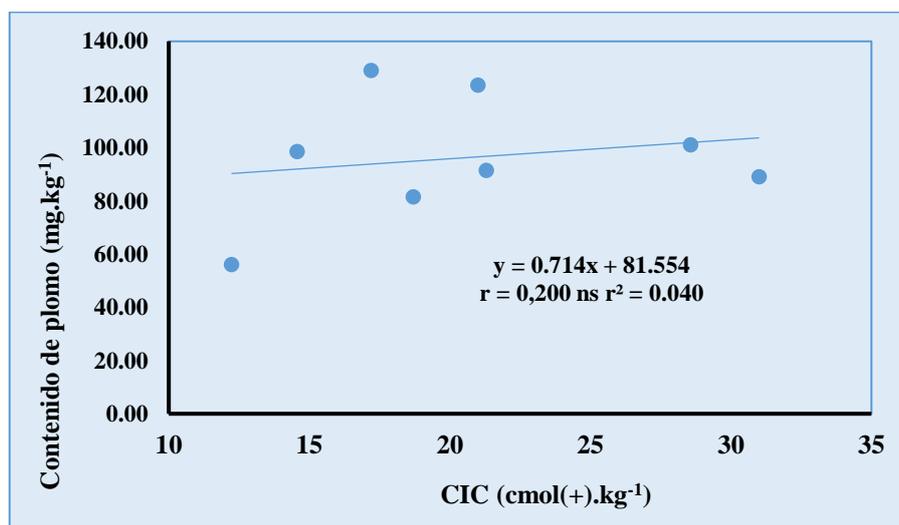


Figura 25. Regresión y correlación de la CIC del suelo y el contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre a capacidad de intercambio catiónico y el contenido de plomo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia sobre el contenido de plomo (Tabla 30). La Figura 26 muestra que la relación entre la CIC y el contenido de plomo es positiva y ascendente ya que al incrementarse la CIC el contenido de plomo aumenta.

Tabla 30

Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de plomo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	286,489	286,489	0,956	0,366 ns
Error	6	1798,886	299,814		
Total	7	2085,375			

$r = 0,371$ ns $r^2 = 0,137$ $Pb_{60} = 49,338 + 2,002 (CIC_{60})$ Fuente: Elaboración propia

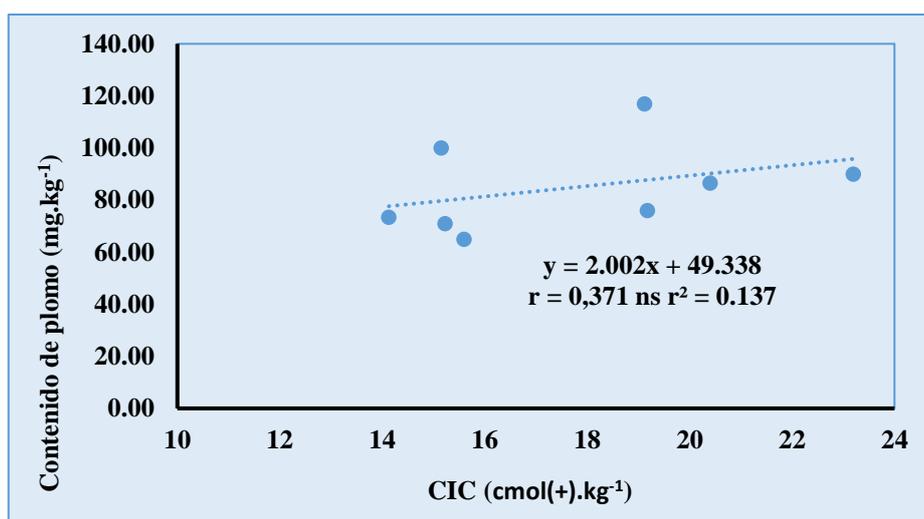


Figura 26. Regresión y correlación de la CIC del suelo y el contenido de Plomo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

b. Contenido de cadmio en relación con la capacidad de intercambio catiónico

La Tabla 31 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre la capacidad de intercambio catiónico de los suelos muestreados y el contenido de cadmio en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 31

Estadísticos del contenido de Cd y CIC a dos profundidades de suelo: 0-20 y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cd (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol(+).kg ⁻¹)	Cd (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol(+).kg ⁻¹)
CA-01	8,75	28,56	12,15	23,20
CA-02	7,90	21,30	8,85	20,40
CA-03	12,05	31,00	15,80	19,18
CA-04	18,90	21,00	19,10	19,12
CA-05	15,90	17,20	17,85	15,15
CA-06	16,85	18,70	19,20	15,23
CA-07	7,25	12,23	8,45	15,60
CA-08	13,45	14,56	15,35	14,13
Promedio	12,63	20,57	14,59	17,75
S	4,39	6,48	4,32	3,20
CV	34,79	31,50	29,63	18,00

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre a capacidad de intercambio catiónico y el contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística significativa indicando que la CIC no tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 32). La Figura 27 muestra que la relación entre la materia orgánica y el contenido de cadmio es inversa ya que al incrementarse la CIC el contenido de cadmio disminuye.

Tabla 32

Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cadmio en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	0,958	0,958	0,043	0,843 ns
Error	6	134,237	22,373		
Total	7	135,195			

$r = 0,084$ ns $r^2 = 0,007$

$Cd_{20} = 13,806 - 0,057 (CIC_{20})$

Fuente: Elaboración propia

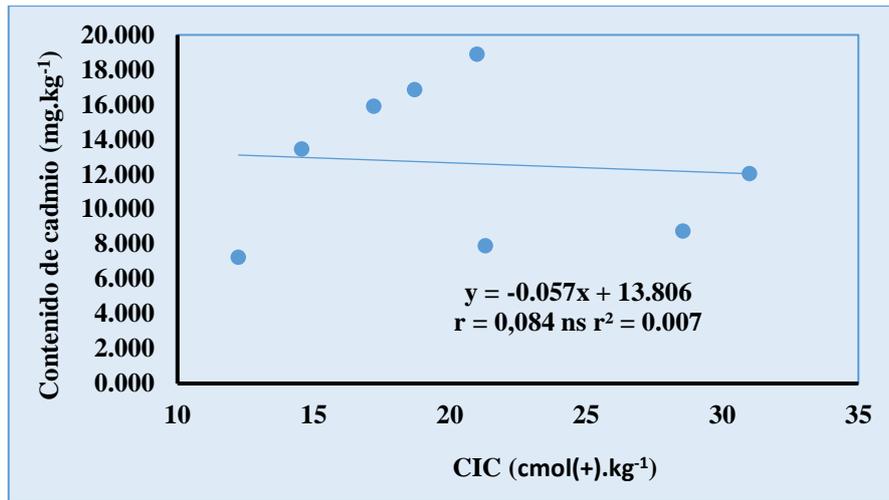


Figura 27. Regresión y correlación de la CIC y el contenido de Cadmio en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre a capacidad de intercambio catiónico y el contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que la CIC no tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 33). La Figura 28 muestra que la relación entre la CIC y el contenido de cadmio es inversa ya que al incrementarse la CIC el contenido de cadmio disminuye.

Tabla 33

Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cadmio en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	12,795	12,795	0,650	0,451 ns
Error	6	118,067	19,678		
Total	7	130,862			

$r = 0,313$ ns $r^2 = 0,098$ $Cd_{60} = 22,104 - 0,423 (Cd_{60})$ Fuente: Elaboración propia

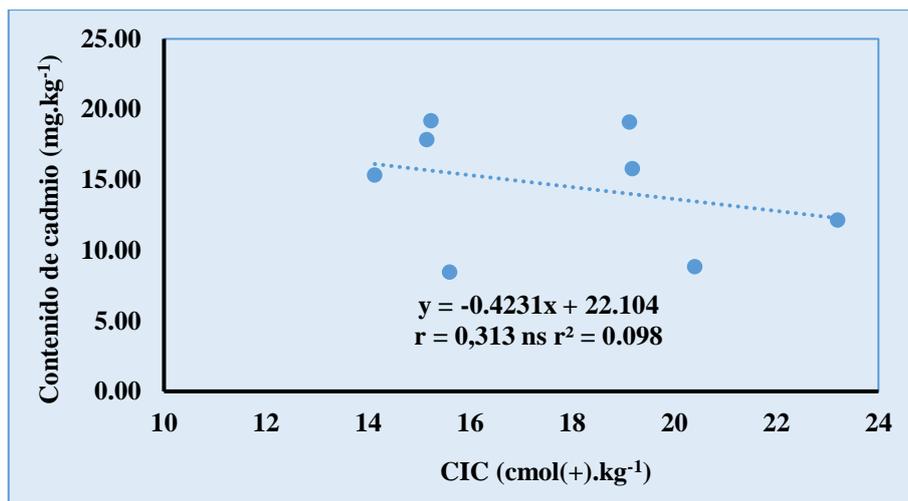


Figura 28. Regresión y correlación de la CIC y contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

c. Contenido de cromo en relación con la capacidad de intercambio catiónico

La Tabla 34 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre la capacidad de intercambio catiónico de los suelos muestreados y el contenido de cromo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 34

Estadísticos del contenido de Cr y valores de CIC a dos profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cr (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol(+).kg ⁻¹)	Cr (mg.kg ⁻¹)	CIC (cmol(+).kg ⁻¹)
CA-01	27,00	28,56	26,50	23,20
CA-02	44,50	21,30	26,50	20,40
CA-03	26,50	31,00	23,00	19,18
CA-04	23,00	21,00	20,00	19,12
CA-05	29,00	17,20	24,50	15,15
CA-06	26,50	18,70	24,00	15,23
CA-07	20,50	12,23	14,50	15,60
CA-08	20,50	14,56	15,50	14,13
Promedio	27,19	20,57	21,81	17,75
S	7,66	6,48	4,69	3,20
CV	28,18	31,50	21,50	18,00

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre a capacidad de intercambio catiónico y el contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que la CIC no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 35). La Figura 29 muestra que la relación entre la materia orgánica y el contenido de cromo es positiva y ascendente ya que al incrementarse la CIC, el contenido de cromo aumenta.

Tabla 35

Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cromo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	29,629	29,629	0,466	0,520 ns
Error	6	381,340	63,557		
Total	7	410,969			

$r = 0,269$ ns $r^2 = 0,072$ $C_{r20} = 20,656 + 0,318 (CIC_{20})$ Fuente: Elaboración propia

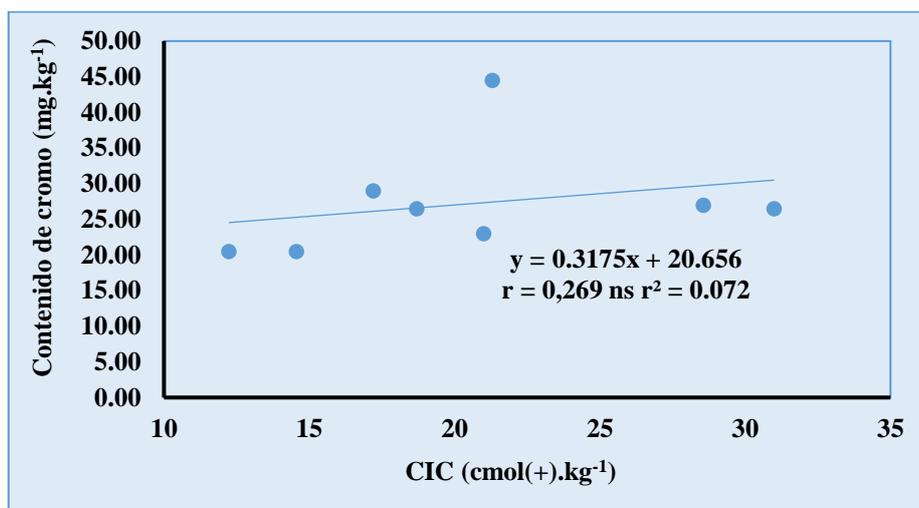


Figura 29. Regresión y correlación de la CIC del suelo y el contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre a capacidad de intercambio catiónico y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que la CIC no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 36). La Figura 30 muestra que la relación entre la CIC y el contenido de cromo es positiva y ascendente ya que al incrementarse la CIC el contenido de cromo aumenta.

Tabla 36

Análisis de regresión entre la CIC y el contenido de cromo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	55,977	55,977	3,427	0,114 ns
Error	6	97,992	16,332		
Total	7	153,969			

$r = 0,603 \text{ ns}$ $r^2 = 0,364$ $Cr_{60} = 6,104 + 0,885 (CIC_{60})$ Fuente: Elaboración propia

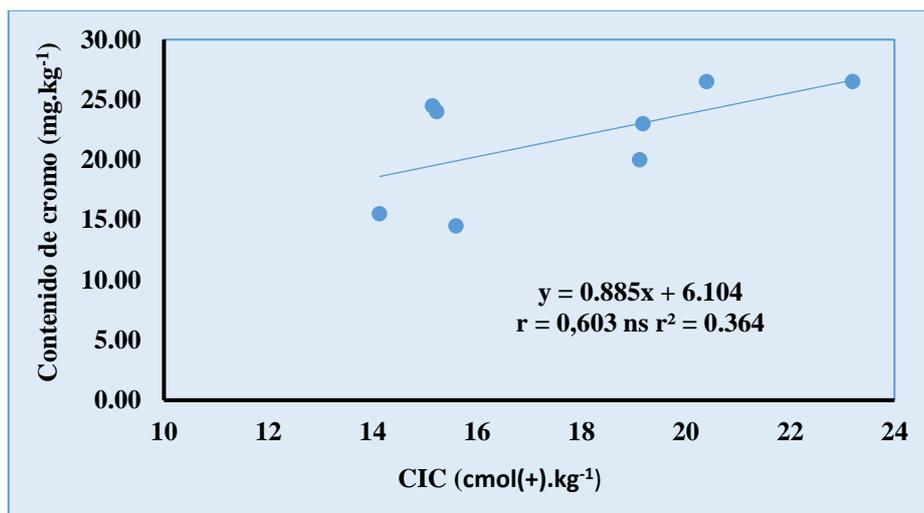


Figura 30. Regresión y correlación de la CIC y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Resultados del contenido de metales pesados y el contenido de arcilla

La Tabla 37 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre arcilla de los suelos muestreados y el contenido de plomo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

a. Contenido de plomo en relación con la arcilla

Tabla 37

Estadísticos de los contenidos de Pb y de arcilla a dos profundidades: 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Pb (mg.kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Pb (mg.kg ⁻¹)	Arcilla (%)
CA-01	101,00	25	90,00	30
CA-02	91,50	20	86,50	20
CA-03	89,00	26	76,00	25
CA-04	123,50	18	117,00	12
CA-05	129,00	32	100,00	11
CA-06	81,50	14	71,00	18
CA-07	56,00	22	65,00	22
CA-08	98,50	30	73,50	21
Promedio	96,25	23,38	84,88	19,88
S	23,16	6,07	17,26	6,31
CV	24,06	25,97	20,34	31,76

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la presencia de la arcilla y el contenido de plomo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que el contenido de arcilla no tuvo influencia sobre el contenido de plomo (Tabla 38). La Figura 31 muestra que la relación entre la arcilla y el contenido de plomo es positiva ya que al aumentar el contenido de arcilla el contenido de plomo aumenta.

Tabla 38

Análisis de regresión entre los contenidos de arcilla y de plomo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	473,003	473,003	0,865	0,388 ns
Error	6	3282,497	547,083		
Total	7	3755,500			

$r = 0,355$ ns $r^2 = 0,126$ $Pb_{20} = 64,592 + 1,354 (Ar_{20})$ Fuente: Elaboración propia

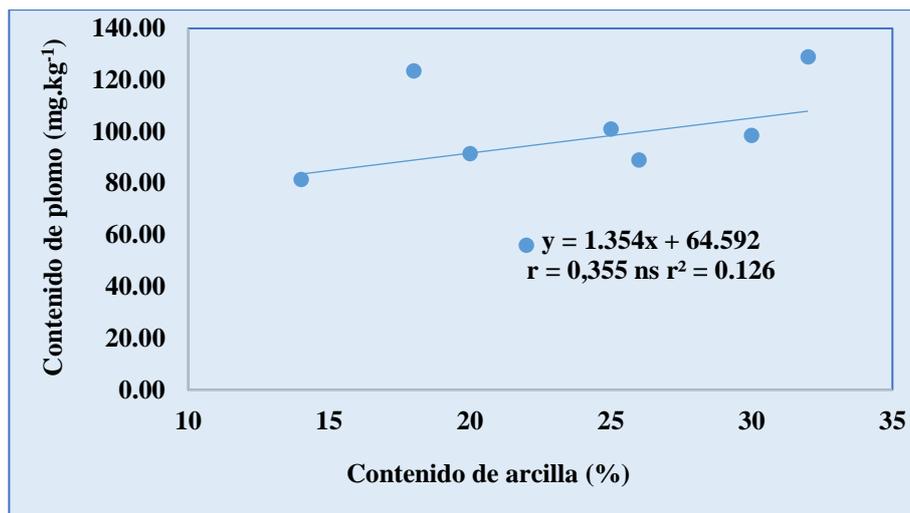


Figura 31. Regresión y correlación entre el contenido de arcilla y de plomo del suelo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la presencia de la arcilla y el contenido de plomo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que la arcilla tuvo una ligera influencia sobre el contenido de plomo (Tabla 39). La Figura 32 muestra que la relación entre la arcilla y el contenido de plomo es inversa ya que al aumentar el contenido de arcilla el contenido de plomo disminuye.

Tabla 39

Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y el contenido de plomo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	601,677	601,677	2,433	0,170 *
Error	6	1483,698	247,283		
Total	7	2085,375			

$r = 0,537^*$ $r^2 = 0,289$ $Pb_{60} = 114,068 - 1,469 (Ar_{60})$ Fuente: Elaboración propia

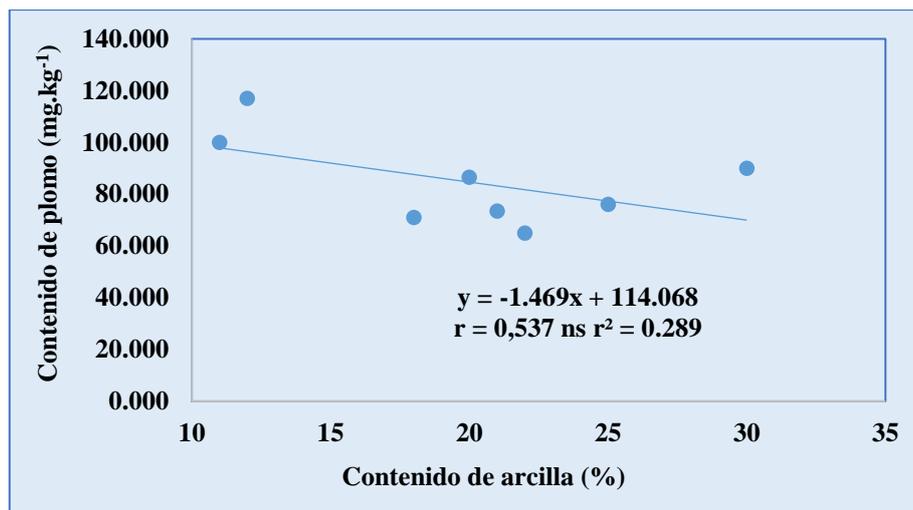


Figura 32. Regresión y correlación entre el contenido de arcilla y de plomo del suelo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

b. Contenido de cadmio en relación con la arcilla

La Tabla 40 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el contenido de arcilla de los suelos muestreados y el contenido de cadmio en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 40

Estadísticos del contenido de Cd y de arcilla a dos profundidades 0-20 cm y 20-60 cm

N° Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cd (mg.kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Cd (mg.kg ⁻¹)	Arcilla (%)
CA-01	8,75	25	12,15	30
CA-02	7,90	20	8,85	20
CA-03	12,05	26	15,80	25
CA-04	18,90	18	19,10	12
CA-05	15,90	32	17,85	11
CA-06	16,85	14	19,20	18
CA-07	7,25	22	8,45	22
CA-08	13,45	30	15,35	21
Promedio	12,63	23,38	14,59	19,88
S	4,39	6,07	4,32	6,31
CV	34,79	25,97	29,63	31,76

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la presencia de la arcilla y el contenido de cadmio en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 41). La Figura 33 muestra que la relación entre la arcilla y el contenido de cadmio es inversa ya que al aumentar el contenido de arcilla el contenido de cadmio disminuye.

Tabla 41

Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	2,251	2,251	0,102	0,761 ns
Error	6	132,944	22,157		
Total	7	135,195			

$r = 0,129$ ns $r^2 = 0,017$ $Cd_{20} = 14,815 - 0,093 (Ar_{20})$ Fuente: Elaboración propia

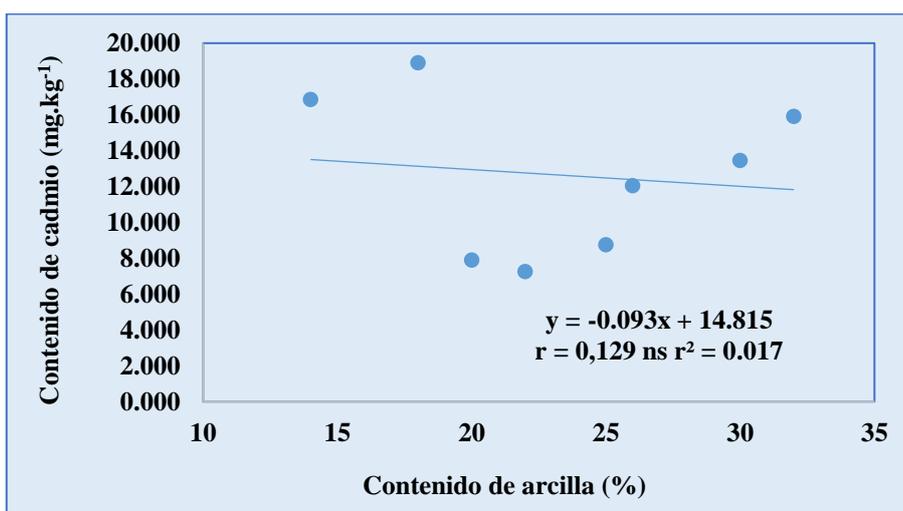


Figura 33. Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la presencia de la arcilla y el contenido de cadmio en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que el pH no tuvo influencia sobre el contenido de cadmio (Tabla 42). La Figura 34 muestra que la relación entre la arcilla y el contenido de cadmio es inversa ya que al aumentar el contenido de arcilla el contenido de cadmio disminuye.

Tabla 42

Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	39,163	39,163	2,562	0,161 ns
Error	6	91,699	15,283		
Total	7	130,862			

$r = 0,547$ ns $r^2 = 0,299$ $Cd_{60} = 22,042 - 0,375 (Ar_{60})$ Fuente: Elaboración propia

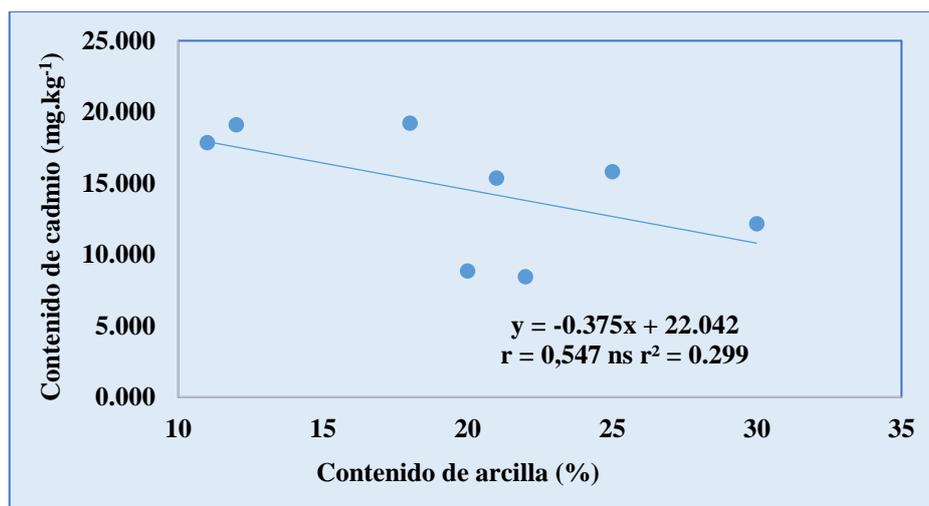


Figura 34. Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cadmio en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

c. Contenido de cromo en relación con la arcilla

La Tabla 43 contiene los estadísticos que se han tenido en cuenta para conocer la relación que existe entre el contenido de arcilla de los suelos muestreados y el contenido de cromo en las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, las comparaciones fueron hechas en base a regresiones y correlaciones ($p \leq 0,05$).

Tabla 43

Estadísticos de los contenidos de Cr y de arcilla a dos profundidades: 0-20 y 20-60 cm

Nº Tratamiento	0-20 cm		20-60 cm	
	Cr (mg.kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Cr (mg.kg ⁻¹)	Arcilla (%)
CA-01	27,00	25	26,50	30
CA-02	44,50	20	26,50	20

Continuación

CA-03	26,50	26	23,00	25
CA-04	23,00	18	20,00	12
CA-05	29,00	32	24,50	11
CA-06	26,50	14	24,00	18
CA-07	20,50	22	14,50	22
CA-08	20,50	30	15,50	21
Promedio	27,19	23,38	21,81	19,88
S	7,66	6,07	4,69	6,31
CV	28,18	25,97	21,50	31,76

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la presencia de la arcilla y el contenido de cromo en la profundidad de 0-20 cm no mostró significación estadística indicando que la arcilla no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 44). La Figura 35 muestra que la relación entre la arcilla y el contenido de cromo es inversa ya que al aumentar el contenido de arcilla el contenido de cromo aumenta.

Tabla 44

Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cromo en la profundidad 0-20 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	10,111	10,111	0,151	0,711 ns
Error	6	400,858	66,810		
Total	7	410,969			

$r = 0,157$ ns $r^2 = 0,025$ $Cr_{20} = 31,816 - 0,198 (Ar_{20})$ Fuente: Elaboración propia

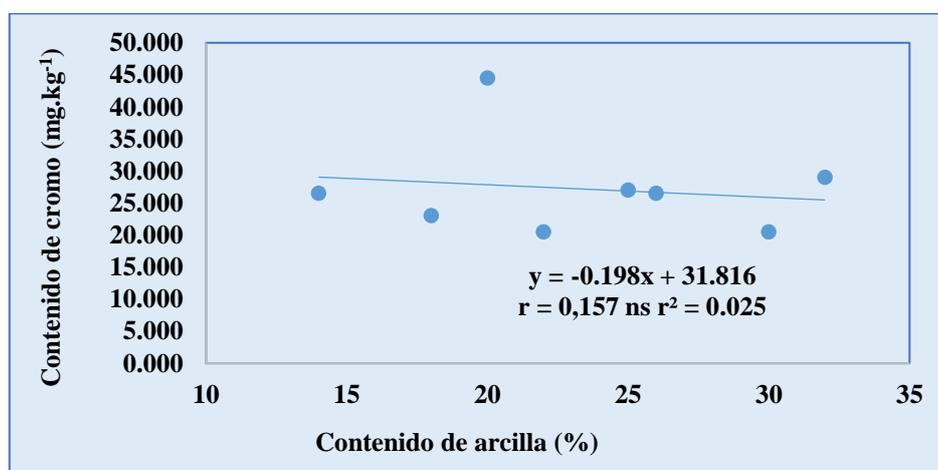


Figura 35. Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cromo en la profundidad de 0-20 cm. Fuente: Elaboración propia

El análisis de la regresión entre la presencia de la arcilla y el contenido de cromo en la profundidad de 20-60 cm no mostró significación estadística indicando que la arcilla no tuvo influencia sobre el contenido de cromo (Tabla 45). La Figura 36 muestra que la relación entre la arcilla y el contenido de cromo es positiva y ascendente ya que al aumentar el contenido de arcilla el contenido de cromo aumenta.

Tabla 45

Análisis de regresión entre el contenido de arcilla y de cromo en la profundidad 20-60 cm

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sign
Regresión	1	1,138	1,138	0,045	0,840 ns
Error	6	152,831	25,472		
Total	7	153,969			

$r = 0,086$ ns $r^2 = 0,007$ $Cr_{60} = 20,543 + 0,064 (Ar_{60})$ Fuente: Elaboración propia

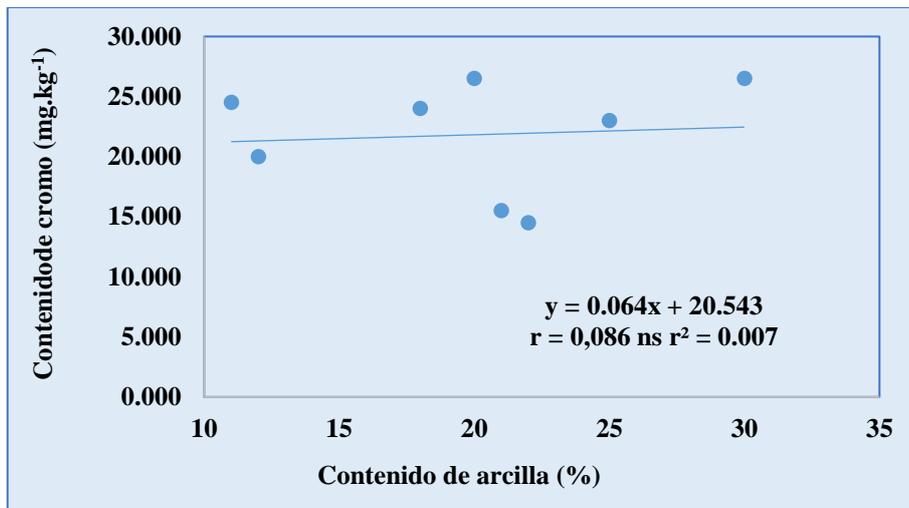


Figura 36. Regresión y correlación del contenido de arcilla y de cromo en la profundidad de 20-60 cm. Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Caracterización de los suelos en estudio

4.1.1. Reacción y conductividad de los suelos

En los resultados del pH y la conductividad eléctrica de los suelos estudiados se puede apreciar que el pH es muy variable con rangos que van desde 4,1 hasta 5,3 en la capa de 0-20 cm de profundidad y de 4,7 a 5,9 a la profundidad de 20-60 cm, permitiendo inferir que los suelos tienen pHs que van desde extremadamente ácidos (3,5 a 4,4), muy fuertemente ácidos (4,5 a 5,0), fuertemente ácidos (5,1 a 5,5) hasta moderadamente ácidos (5,6 a 6,0), lo cual es característico en los suelos alto andinos donde la precipitación es mayor con relación a los valles interandinos. Los niveles de salinidad en todos los puntos de muestreo son muy bajos no superando la unidad en ninguno de los casos (0,30 a 0,58), indicando que en los suelos adyacentes a la mina Antamina, no presenta problemas de salinidad. La tendencia del pH y la salinidad es generalmente menor en la capa superficial, con algunas excepciones. Al respecto, Guerrero y Pineda (2016) indican que a mayor grado de acidez y salinidad los suelos son más proclives a acumular metales pesados a niveles de mayor toxicidad, aclarando que la acumulación de metales en el suelo no solo depende de estos parámetros, también se debe a otros factores tales como la textura, porcentaje de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico.

4.1.2. Clases texturales

Con respecto a la textura se han encontrado suelos francos arcillo arenosos en mayor cantidad y suelos franco arenosos en menor cantidad, correspondiendo los primeros al tipo de suelos finos y los segundos a suelos del tipo moderadamente gruesos, los que determinarán diferencias en cuanto a la retención de la humedad, la lixiviación, el drenaje y el grado de erosión. La fracción predominante es la arena, seguida del limo y finalmente la arcilla. Es conveniente tener en cuenta que las arcillas, por su naturaleza, tienden a adsorber a los metales pesados en sus posiciones de cambio y cada tipo de arcilla posee valores

diferentes de superficie específica que es responsable. Se debe tener en cuenta que las propiedades del suelo, dentro de ellos la textura, tienen efecto positivo sobre la acumulación de los metales pesados (Malhecha *et al.*, 2015). Además, Chambi *et al.* (2012) agregan que se debe tener en cuenta que, al aumentar el contenido de arcilla, se disminuyen los riesgos de la degradación del suelo debido a la disminución de los metales pesados disponibles presentes en el suelo.

4.1.3. Materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico

En los resultados de la materia orgánica y de la capacidad de intercambio catiónico se observa que el contenido de MO es muy variable desde 1,21 hasta 6,9 %, indicando que esta propiedad está en función a la ubicación de los puntos de muestreo y al grado de erosión a los que están sujetos estos suelos debido a la pendiente predominantemente excesiva. Como consecuencia de la textura y el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico también es variable, desde 12,23 hasta 31,0 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, lo que permite calificar a la mayoría de estos suelos como de alta (12-20 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$) a muy alta ($> 20 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$)¹⁾ CIC, característico en los suelos altoandinos que, a pesar de tener muy poca vegetación existe una mayor concentración de MO y consecuentemente una alta CIC. También se observa la tendencia a que los contenidos de MO y la CIC sean mayores en la capa de 0-20 cm y menores en las capas de 20-60 cm. Cabe mencionar lo indicado por Larios (2014), quien señala que los suelos ligeros tienen baja capacidad de fijar metales pesados, los cuales pueden pasar fácilmente a los estratos profundos y contaminar la napa freática. Asimismo, indica que la CIC tiene la capacidad de retener a los cationes que pueden ser lavados fácilmente o pasar a la solución suelo para que las plantas puedan absorberlos. Además, se debe tener en cuenta lo citado por Puga *et al.* (2006) en el sentido de que los metales pesados también pueden asociarse a la materia orgánica ocasionando la degradación del suelo, aclarando que al tener contenidos menores de M.O. se corre el riesgo de generarse erosión de los suelos.

4.2. Contenido de metales pesados: cadmio, cromo y plomo

Con respecto al contenido Cd en los suelos agrícolas adyacentes a Antamina se observa que este metal se encuentra en cantidades muy variables, desde 7,90 hasta 19,90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, valores que superan el estándar de calidad ambiental (ECA) señalado por el Ministerio del Ambiente

[MINAM] (2017) que es de $1,4 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. Del mismo modo, el contenido de cromo que también es muy variable con cantidades que oscilan entre 14,5 a $27,0 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, valores que superan ampliamente a ECA señalado por el MINAM (2017) correspondiente al $0,4 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. Del mismo modo el Pb está en niveles muy variables desde 56,0 a $129,0 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, valores que superan, con algunas excepciones, al ECA que es de $70 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. La tendencia en el Cd es ser mayor en las capas de 20 a 60 cm y del Cr y el Pb de ser mayores en las capas de 0-20 cm. Al respecto, Puga *et al.* (2006) señalan en función a la textura y la distancia, la mayor concentración de minerales pesados se encuentra entre los 40 a 60 cm de profundidad. Sotomayor (2016) indica que la presencia de los metales pesados en los suelos aledaños son consecuencia de la actividad minera que se desarrolló en la zona de estudio.

4.3. Regresiones y correlaciones entre el contenido del metal pesado y las propiedades del suelo

4.3.1. Contenido de metal pesado con relación al pH

a. Plomo y pH

Con respecto al pH y contenido de plomo en el suelo a dos profundidades se ha encontrado que esta propiedad es variable con un promedio del pH 4,76 y de Pb con $96,25 \text{ mg Pb}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 24,06 considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de pH fue mayor (5,29) y el contenido total de Pb fue de $84,88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 20,34\%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Pb en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor de $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, indicando que estos suelos están contaminados con plomo en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El pH del suelo es calificado como extremadamente ácido en la capa de 0-20 cm ($\text{pH} = 3,6 - 4,40$) y muy fuertemente ácido en la capa de 20-60 cm ($\text{pH} = 4,5 - 9,0$); lo cual favorece la disponibilidad del Pb en el suelo. Puga *et al.* (2006) agrega al respecto, que el pH por encima de la neutralidad y la mayor distancia del relave tiene un efecto negativo con respecto a la acumulación del Pb y el Ca.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión del pH con el contenido de Pb a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir, el pH no influye en el contenido de Pb del suelo. Estos datos están representados en las Figuras 6 y 7, donde se muestra la dispersión de los datos. Se reitera el concepto de Puga *et al.* (2006) en el sentido de que el pH cuando es alto y la mayor distancia del relave tiene un efecto negativo con respecto a la acumulación del Pb y el Ca. Del mismo modo Guerrero y Pineda (2016) indicaron que a mayor grado de acidez y salinidad los suelos son más proclives a acumular metales pesados a niveles de mayor toxicidad, aclarando que la acumulación de metales en el suelo no solo depende de estos parámetros, también se debe a otros factores tales como la textura, porcentaje de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico.

b. Cadmio y pH

De igual manera en el pH y el contenido de cadmio en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de 4,76 de pH con 12,63 mg Cd.kg⁻¹ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 34,79 considerado muy alto; en cambio en la capa de 20-60 cm el promedio de pH fue mayor (5,29) y el contenido de Cd fue de 14,59 mg.kg⁻¹, superior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 29,73 \%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cd en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor de 1,4 mg.kg⁻¹, indicando que estos suelos están contaminados con cadmio en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El pH del suelo es calificado como extremadamente ácido en la capa de 0-20 cm (pH = 3,6 – 4,40) y muy fuertemente ácido en la capa de 20-60 cm (pH = 4,5 – 6,0); lo cual favorece la disponibilidad del Cd en el suelo. Según Martínez *et al.* (2017), en cuanto a los resultados del pH encontraron que fluctuaron entre 3,99 y 5,09, manifestando que los metales pesados se encuentran disponibles a estos rangos de pH.

En el análisis de varianza de la regresión del pH con el contenido de Cd a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que presentan significación estadística entre ambas variables;

es decir el pH influye en el contenido de Cd del suelo. Estos datos están representados en las Figuras 8 y 9, donde se muestra la dispersión de los datos.

c. Cromo y pH

En la relación entre el pH y el contenido de Cr en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio del pH de 4,76 con 27,19 mg de Cr.kg⁻¹ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 20,18 % es considerado alto; en cambio en la capa de 20-60 cm el promedio de pH fue mayor (5,29) y el contenido total de Cr fue de 21,81 mg.kg⁻¹, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 21,50\%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cr en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor de 0,4 mg de Cr.kg⁻¹, indicando que estos suelos están fuertemente contaminados con plomo en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El pH del suelo es calificado como extremadamente ácido en la capa de 0-20 cm (pH = 3,6 – 4,40) y muy fuertemente ácido en la capa de 20-60 cm (pH = 4,5 – 9,0); lo cual favorece la disponibilidad del Cr en el suelo, concepto estrechamente relacionado con lo por Martínez *et al.* (2017), quienes agregan que, a pH ácido extremo o ácidos muy fuertes, los metales pesados tienen una mayor disponibilidad.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión el pH con el contenido de Pb a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir el pH no influye en el contenido de Cr del suelo. El contenido de Cr en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores como la acidez y el nivel de mineralización de los suelos (Guerrero y Pineda, 2016). Estos datos están representados en las Figuras 10 y 11, donde se muestra la dispersión de los datos.

4.3.2. Contenido de metal pesado con relación a la materia orgánica

a. Plomo y materia orgánica

En cuanto a la materia orgánica y contenido de plomo en el suelo en las dos profundidades, se tuvo un promedio de 96,25 mg Pb.kg⁻¹ con un contenido de 3,22 g de MO.kg⁻¹ en la capa

de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 24,06 considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la MO fue menor ($1,67 \text{ g.kg}^{-1}$) y el contenido total de Pb fue de $84,88 \text{ mg.kg}^{-1}$, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 20,34\%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Pb en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor de 70 mg.kg^{-1} , indicando que estos suelos están contaminados con plomo en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El contenido de MO del suelo es calificado como de pobre a muy alto en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($MO = < 2$ hasta > 4); lo cual favorece medianamente la disponibilidad del Pb en el suelo. Además, Puga *et al.* (2006) indica que los metales pesados también pueden asociarse a la materia orgánica ocasionando la degradación del suelo, aclarando que al tener contenidos bajos menores 0,91 % se corre el riesgo de generarse erosión de los suelos.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la MO con el contenido de Pb a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir la MO no influyó en el contenido de Pb del suelo. El contenido de Pb en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 12 y 13, donde se muestra la dispersión de los datos.

b. Cadmio y materia orgánica

En los resultados de la materia orgánica y contenido de cadmio en el suelo a dos profundidades, observó un promedio de $12,63 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ con un contenido de $3,22 \text{ g de MO.kg}^{-1}$ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 34,79 % considerado muy alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la MO fue menor ($1,67 \text{ g.kg}^{-1}$) y el contenido total de Cd fue de $14,59 \text{ mg.kg}^{-1}$, superior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 29,63 \%$) en la capa de 0-20 cm, indicando una menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cd en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mucho mayor que $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$, indicando que estos suelos están contaminados con cadmio en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El contenido de MO del suelo es calificado como de pobre a muy alto en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($MO = < 2$ hasta > 4); lo cual favorece medianamente la disponibilidad del Cd en el suelo. Al respecto, Puga *et al.* (2006) indican que los metales pesados también

pueden asociarse a la materia orgánica produciendo la degradación del suelo. Además, suelos con contenidos menores de materia corren el riesgo de una erosión severa.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la MO con el contenido de Cd a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir la MO no influyó en el contenido de Cd del suelo. El contenido de Cd en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 14 y 15, donde se muestra la dispersión de los datos.

c. Cromo y materia orgánica

En cuanto a los resultados de la materia orgánica y contenido de cromo en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de 27,19 mg Cr.kg⁻¹ con un contenido de 3,22 g de MO.kg⁻¹ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 28,18 considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la MO fue menor (1,67 g.kg⁻¹) y el contenido total de Cr fue de 21,81 mg.kg⁻¹, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 21,50 \%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cr en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor de 0,4 mg.kg⁻¹, indicando que estos suelos están contaminados con cromo en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El contenido de MO del suelo es calificado como de pobre a muy alto en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($MO = < 2$ hasta > 4); lo cual no favorece la disponibilidad del Cr en el suelo. Asimismo, Puga *et al.* (2006) indican que la presencia de metales pesados asociados a la materia orgánica ocasiona la degradación del suelo,

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la MO con el contenido de Cr a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir, la MO no influyó en el contenido de Cr del suelo. El contenido de Cr en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 16 y 17, donde se muestra la dispersión de los datos.

4.3.3. Contenido de metal pesado con relación a la CIC

a. Plomo y capacidad de intercambio catiónico

En los resultados de la capacidad de intercambio catiónico y contenido de plomo en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de $96,25 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$ con un contenido de $20,57 \text{ g de CIC kg}^{-1}$ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 24,06 considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la CIC fue menor ($1,67 \text{ g.kg}^{-1}$) y el contenido total de Pb fue de $84,88 \text{ mg.kg}^{-1}$, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 20,34 \%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Pb en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor de 70 mg.kg^{-1} , indicando que estos suelos están contaminados con plomo en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. El contenido de CIC del suelo es calificado como moderadamente alta a muy alta en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($CIC = 12 \text{ a } 20 \text{ a } > 20 \text{ cmol (+).kg}^{-1}$); lo cual no favorece la disponibilidad del Pb en el suelo. Según Martínez *et al.* (2017) señalaron que la CIC con rangos moderados de $13,10 \text{ a } 31,20 \text{ cmol(+).kg}^{-1}$, ocasionan cierta inhibición en el proceso de mineralización de los metales pesados en el suelo.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la CIC con el contenido de Pb a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir la CIC no influyó en el contenido de Pb del suelo. El contenido de Pb en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 18 y 19, donde se muestra la dispersión de los datos.

b. Cadmio y capacidad de intercambio catiónico

En la capacidad de intercambio catiónico y contenido de cadmio en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de $12,63 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ con un contenido de $20,57 \text{ cmol de CIC.kg}^{-1}$ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 34,79 % considerado muy alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la CIC fue menor ($17,75 \text{ cmol.kg}^{-1}$) y el contenido total de Cd fue de $14,59 \text{ mg.kg}^{-1}$, superior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 29,63 \%$) que la capa de 0-20

cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cd en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mucho mayor que $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$, indicando que estos suelos están contaminados con cadmio en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. La CIC del suelo es calificado como de moderadamente alto a muy alto en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($\text{CIC} = 12 \text{ a } > 20$); lo cual favorece medianamente la disponibilidad del Cd en el suelo. Martínez *et al.* (2017) señalan al respecto que un nivel moderado de la CIC ($13,10 \text{ a } 31,20 \text{ cmol}(+).\text{kg}^{-1}$), producen cierta inhibición en la mineralización que controlan las concentraciones de los metales pesados en el suelo.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la CIC con el contenido de Cd a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir la CIC no influyó en el contenido de Cd del suelo. El contenido de Cd en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 20 y 21, donde se muestra la dispersión de los datos.

c. Cromo y capacidad de intercambio catiónico

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico y contenido de cromo en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de $27,19 \text{ mg Cr.kg}^{-1}$ con un contenido de $20,57 \text{ cmol de CIC.kg}^{-1}$ en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 28,18 % considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la CIC fue menor ($17,75 \text{ cmol.kg}^{-1}$) y el contenido promedio de Cr fue de $21,81 \text{ mg.kg}^{-1}$, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($\text{VC}_{20-60} = 51,50 \%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cr en ambas capas de suelo superó ampliamente al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mucho mayor que $0,4 \text{ mg.kg}^{-1}$, indicando que estos suelos están contaminados con cromo en las capas de 0-20 cm y de 20-60 cm. La CIC del suelo es calificado como de moderadamente alto a muy alto en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($\text{CIC} = 12 \text{ a } > 20$); lo cual no favorece la disponibilidad del Cr en el suelo. En estos resultados también es recomendable tener en cuenta los resultados obtenidos por Martínez *et al.* (2017), referente a que la CIC entre los rangos de $13,10 \text{ a } 31,20 \text{ cmol}(+).\text{kg}^{-1}$ producen una cierta inhibición en la mineralización de los metales pesados en el suelo, lo cual los hace menos disponibles.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la CIC con el contenido de Cr a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir la CIC no influyó en el contenido de Cr del suelo. El contenido de Cr en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 22 y 23, donde se muestra la dispersión de los datos.

4.3.4. Contenido de metal pesado con relación al contenido de arcilla

a. Plomo y contenido de arcilla

En los resultados de la arcilla y contenido de plomo en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de 96,25 mg Pb.kg⁻¹ con un contenido de 23,38 % arcilla en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 24,06 % considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la arcilla fue ligeramente menor (19,88 %) y el contenido promedio de Pb fue de 84,88 mg.kg⁻¹, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 20,34\%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Pb en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor que 70 mg.kg⁻¹, con algunas excepciones, indicando que estos suelos están contaminados con plomo tanto en las capas de 0-20 cm como de 20-60 cm. El contenido de arcilla del suelo es calificado como muy variable en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($Ar = 11$ a 32%); lo cual no favorece la disponibilidad del Pb en el suelo. Al respecto, Chambi *et al.* (2012) agregan que se debe tener en cuenta que, al aumentar el contenido de arcilla, disminuyen los riesgos de la degradación del suelo debido a la disminución de los metales pesados en forma disponible.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la textura con el contenido de Pb a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir la arcilla no influyó en el contenido de Pb del suelo. El contenido de Pb en el suelo, a ambas profundidades se debe a la actividad minera que se está desarrollando en la zona.

b. Cadmio y contenido de arcilla

En los resultados de arcilla y contenido de cadmio en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de 122,63 mg Cd.kg⁻¹ con un contenido de 23,38 % arcilla en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 34,79 % considerado muy alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la arcilla fue ligeramente menor (19,88 %) y el contenido promedio de Cd fue de 14,59 mg.kg⁻¹, superior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 29,63 \%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cd en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor que 1,4 mg.kg⁻¹, indicando que estos suelos están contaminados con cadmio tanto en las capas de 0-20 cm como de 20-60 cm. El contenido de arcilla del suelo es calificado como muy variable en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($Ar = 11$ a 32%); lo cual no favorece la disponibilidad del Cd en el suelo. Asimismo, Chambi *et al.* (2012) agregan que, al aumentar el contenido de arcilla, se disminuyen los riesgos de la degradación debido a la disminución en la disponibilidad de los metales pesados presentes en el suelo.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la arcilla con el contenido de Cd a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir, la arcilla no influyó en el contenido de Cd del suelo. El contenido de Cd en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores. Estos datos están representados en las Figuras 26 y 27, donde se muestra la dispersión de los datos.

c. Cromo y contenido de arcilla

En los resultados de arcilla y contenido de cromo en el suelo a dos profundidades, se observó un promedio de 27,19 mg Cr.kg⁻¹ con un contenido de 23,38 % arcilla en la capa de 0-20 cm, con un coeficiente de variación de 28,18 % considerado alto; en cambio en la capa de 20 a 60 cm el promedio de la arcilla fue ligeramente menor (19,88 %) y el contenido promedio de Cr fue de 21,81 mg.kg⁻¹, inferior a la capa de 0-20 cm. Asimismo, el coeficiente de variación fue menor ($VC_{20-60} = 21,50 \%$) que la capa de 0-20 cm, indicando una relativa menor variabilidad de los datos evaluados. El contenido de Cr en ambas capas de suelo superó al ECA para suelos del Perú (MINAM, 2017), pues es mayor que 0,4 mg.kg⁻¹,

indicando que estos suelos están contaminados con cromo tanto en las capas de 0-20 cm como de 20-60 cm. El contenido de arcilla del suelo es calificado como muy variable en las capas de 0-20 y de 20-60 cm ($Ar = 11$ a 32%); lo cual no favorece la disponibilidad del Cr en el suelo. Asimismo, se debe tener en cuenta los resultados obtenidos por Chambi *et al.* (2012) quienes agregan que los riesgos de la degradación del suelo producida por la disminución de los metales pesados ocurren cuando las arcillas se encuentran en altos porcentajes.

Al relacionar mediante el análisis de varianza de la regresión de la arcilla con el contenido de Cr a la profundidad de 0-20 y de 20-60 cm, se observa que no presentan significación estadística entre ambas variables; es decir, la arcilla no influyó en el contenido de Cr del suelo, tal como se presentan en las Tablas 44 y 45. El contenido de Cr en el suelo, a ambas profundidades se debe a otros factores.

4.4. Diagrama de caja y prueba de t

4.4.1. Contenido de plomo

Con relación al contenido de Pb en el diagrama de caja se observó que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a $95,00 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$; el percentil 75 es $117,88 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$ y el percentil 25 es $83,38 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$; el límite superior es $129,0 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$ y el límite inferior es $56,00 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a $81,25 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$; el percentil 75 es $97,50 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$ y el percentil 25 es $71,63 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$; el límite superior es $117,00 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$ y el límite inferior es $65,00 \text{ mg Pb.kg}^{-1}$. Al realizar la prueba de t como el p valor es superior al nivel de significación ($p > 0,05$), se acepta la H_0 y se rechaza la H_a ; afirmándose que los promedios de Pb son iguales estadísticamente.

4.4.2. Contenido de cadmio

En el diagrama de caja del contenido de Cd se observa, que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a $12,75 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$; el límite superior es $18,90 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ y el límite

inferior es 7,25 mg Cd.kg⁻¹; el percentil 75 es 16,61 mg Cd.kg⁻¹ y el percentil 25 es 8,11 mg Cd.kg⁻¹. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 15,80 mg Cd.kg⁻¹; el percentil 75 es 18,79 mg Cd.kg⁻¹ y el percentil 25 es 9,68 mg Cd.kg⁻¹; el límite superior es 19,20 mg Cd.kg⁻¹ y el límite inferior es 8,45 mg Cd.kg⁻¹. Los datos se presentan en la Figura 31. En la prueba de t como el p valor es superior al nivel de significación ($p > 0,05$), se acepta la H_0 y se rechaza la H_a ; se puede afirmar que los promedios del contenido de Cd son iguales estadísticamente.

4.4.3. Contenido de cromo

En el diagrama de caja con respecto al contenido de Cr se observa, que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a 26,50 Cr.kg⁻¹; el límite superior es 29,0 Cr.kg⁻¹ y el límite inferior es 20,50 mg Cr.kg⁻¹; el percentil 75 es 29,00 mg Cr.kg⁻¹ y el percentil 25 es 21,13 mg Cr.kg⁻¹. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 23,50 mg Cr.kg⁻¹; el percentil 75 es 26,0 mg Cr.kg⁻¹ y el percentil 25 es 16,63 mg Cr.kg⁻¹; el límite superior es 26,50 mg Cr.kg⁻¹ y el límite inferior es 14,50 mg Cr.kg⁻¹. El dato máximo superior atípico en la profundidad de 0 a 20 cm, es de 44,50 mg Cr.kg⁻¹suelo. Mediante la prueba de t al encontrarse que el p valor es superior al nivel de significación ($p > 0,05$), se acepta la H_0 y se rechaza H_a ; se puede afirmar que los promedios son iguales estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 48.

4.4.4. pH

En el diagrama de caja con respecto al pH, observa que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a 4,80; el percentil 75 es 5,18 y el percentil 25 es 4,40; el límite superior es 5,30 y el límite inferior es 4,10. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 5,30; el percentil 75 es 5,78 y el percentil 25 es 4,80; el límite superior es 5,90 y el límite inferior es 4,70. En la prueba de t como el p valor es inferior al nivel de significación ($p > 0,05$), se rechaza la H_0 y se acepta H_a ; se puede afirmar que los promedios son diferentes estadísticamente. El pH a la profundidad de 0-20 cm es superior al pH a la profundidad de 20-60 cm.

4.4.5. Materia orgánica

Se observa, que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a 2,67 %; el límite superior es 4,79 % y el límite inferior es 1,96 %; el percentil 75 es 6,09 % y el percentil 25 es 1,65 %. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 1,65 %. El percentil 75 es 1,99 % y el percentil 25 es 1,25 %; el límite superior es 1,99 % y el límite inferior es 0,78 %. Al realizar la prueba de t, el p valor es inferior al nivel de significación ($p > 0,05$), se rechaza la H_0 y se acepta la H_a ; se puede afirmar que los promedios del contenido de MO son diferentes estadísticamente. El promedio de Mo en la capa de 0-20 cm es superior al contenido de MO en la capa de 20-60 cm.

4.4.6. Capacidad de intercambio catiónico

Se observa en el diagrama de caja que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a 19,85 cmol.kg^{-1} ; el límite superior es 31,00 cmol.kg^{-1} y el límite inferior es 12,23 cmol.kg^{-1} ; el percentil 75 es 26,75 cmol.kg^{-1} y el percentil 25 es 15,22 cmol.kg^{-1} . En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 17,39 cmol.kg^{-1} ; el percentil 75 es 20,10 cmol.kg^{-1} y el percentil 25 es 15,17 cmol.kg^{-1} . El límite superior es 23,20 cmol.kg^{-1} y el límite inferior es 14,13 cmol.kg^{-1} . Como en la prueba de t el p valor de p es superior al nivel de significación ($p > 0,05$), se acepta la H_0 y se rechaza la H_a ; se puede afirmar que los promedios del contenido de CIC son iguales estadísticamente.

4.4.7. Contenido de arcilla

En el diagrama de caja con relación a la arcilla se observa que, en la profundidad de 0 a 20 cm, la mediana es igual a 23,50 %. El límite superior es 32,00 % y el límite inferior es 14,00 %; el percentil 75 es 29,00 % y el percentil 25 es 18,50 %. En la profundidad de 20 a 60 cm, la mediana es igual a 20,50 %; el percentil 75 es 24,25 % y el percentil 25 es 13,50 %; el límite superior es 30,00 % y el límite inferior es 11,00 %. Los datos se presentan en la figura 36. Como en la prueba de t el p valor es superior al nivel de significación ($p > 0,05$), se acepta la H_0 y se rechaza la H_a ; afirmándose que los promedios del contenido de arcilla a las dos profundidades del suelo son iguales estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 52

CAPITULO V: CONCLUSIONES

1. La caracterización de los suelos en estudio muestra que el pH es muy variable tanto en la capa de 0-20 cm como de 20-60 cm de profundidad, con rangos que van desde 4,1 (suelos extremadamente ácidos) hasta 5,9 (Suelos moderadamente ácidos), lo cual es característico en suelos altoandinos donde la precipitación, que es mayor, ha permitido un intenso lavaje de las bases de los suelos. Estos valores de pH permiten que los minerales pesados se presenten en forma asimilable para ser absorbidos por las plantas.

Los niveles de conductividad eléctrica en todos los puntos de muestreo son muy bajos, en la capa de 0 - 20 cm con un rango de $0,33 \text{ dS.m}^{-1}$ hasta $0,48 \text{ dS.m}^{-1}$ y en la capa 20 – 60 cm desde un rango de $0,37 \text{ dS.m}^{-1}$ hasta $0,58 \text{ dS.m}^{-1}$, no superando la unidad en ninguno de los casos, lo cual indica que en los suelos adyacentes a la mina Antamina no se tienen problemas de salinidad, lo que indica que no habrá restricciones en el crecimiento normal de las especies de plantas a cultivarse en la zona en estudio. Existe una tendencia a que la salinidad sea mayor de 20 a 60 cm de profundidad del perfil.

Los suelos estudiados tienen texturas finas (francos arcillo arenosa) mayormente y suelos moderadamente gruesos (franco arenoso) en menor cantidad, las que determinarán diferencias en cuanto a la retención de la humedad, la lixiviación, el drenaje y el grado de erosión. Claramente se nota que la fracción que predomina es la arena, seguida del limo y finalmente la arcilla, así como esta propiedad favorece la presencia en forma disponible de los microelementos estudiados y favorece a una mayor erosión de los suelos.

La capacidad de intercambio catiónico también es variable, pero en la mayoría de los casos es calificada como de alta a muy alta, característica propia de los suelos altoandinos que a pesar de tener muy poca vegetación presenta, además, una mayor concentración de MO lo que favorece para una alta CIC y ambas favorecen a una

mayor disponibilidad del Pb, Cd y Cr. También se observa la tendencia de que los contenidos de MO y la CIC son mayores en la capa de 0-20 cm y menores en las capas de 20-60 cm.

Respecto al pH y la M.O., se concluye que en el diagrama de cajas y la prueba t los promedios son diferentes estadísticamente, ya que los valores del pH 4,9 y la M.O. no superan el nivel de significancia ($p > 0,05$) en ninguna de las profundidades estudiadas (0 a 20 y de 20 a 60 cm respectivamente), indicando que los promedios de pH y la M.O son mayores en la capa de 0 a 20 cm de profundidad. Por otro lado, la CIC y el contenido de arcilla son iguales estadísticamente, ya que presentan un p-valor mayor al nivel de significancia ($p > 0,05$). Por lo tanto, se afirma que existe similitud en el contenido de la CIC y de la arcilla en dos profundidades de los suelos.

2. En cuanto al contenido de los elementos pesados Cd, Cr y Pb en los suelos adyacentes a la mina Antamina, se observa que el cadmio se encuentra en cantidades muy variables, valores que van desde $7,25 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ hasta $19,20 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ en las profundidades de 0-20 y de 20-60 cm respectivamente, superando en todos los casos el estándar de calidad ambiental ECA, que es $1,4 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. El contenido de cromo también es muy variable, los valores fluctúan desde $14,50 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ hasta $29,00 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, valores que superan ampliamente al ECA que es $0,4 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cr en terrenos agrícolas. Del mismo modo el Pb está en niveles muy variables, desde $65,00 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ hasta $129,50 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, superando con algunas excepciones al ECA, que es $70,0 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ señalado por el MINAM (2017), los resultados obtenidos muestran que probablemente la empresa minera Antamina esté influenciando directamente en la concentración elevada de metales pesados (Cd, Cr y Pb) en los suelos agrícolas adyacentes a la actividad minera, de igual manera es posible que el transporte que traslada productos y/o materiales mineros también sea una fuente de contaminación.

En relación con diagrama de cajas y la prueba de t para el contenido de Pb, Cd y Cr, se afirma que los promedios de los metales pesados en estudio son iguales estadísticamente en ambas profundidades (0 a 20 y 20 a 60 cm respectivamente), debido a que el p-valor de la prueba t es superior al nivel de significancia ($p > 0,05$)

en los tres casos. Por lo tanto, se concluye que hay una similitud en cuanto al contenido de metales pesados en las dos profundidades estudiadas de los suelos agrícolas adyacentes a la mina Antamina.

3. Al efectuarse las regresiones y correlaciones entre los metales con las propiedades del suelo se ha encontrado que el pH del suelo tiene significación estadística en ambas variables con el contenido de cadmio en el suelo en las profundidades de 0-20 y de 20 a 60 cm, lo que quiere decir que al disminuir el pH el contenido de cadmio aumenta en el suelo. El resto de las comparaciones del pH con el cromo y con el plomo tuvieron significancia estadística en ambas profundidades del suelo.

Las regresiones y correlaciones entre la materia orgánica con la presencia de los metales pesados cadmio, cromo y plomo no han sido significativas aunque el contenido de materia orgánica conjuntamente con el pH del suelo, juegan un rol sumamente importante en la retención y disponibilidad de los elementos pesados, quizá la altitud en que encontraban la zona en estudio, que superaban los 3 800 m.s.n.m., hayan restringido en cierto modo, la acción de la materia orgánica que se encontraba en contenidos altos, en algunos perfiles.

Las regresiones entre la capacidad de intercambio catiónico el contenido de arcilla en los suelos en estudio, no son significativas en relación con la presencia del cadmio, cromo y plomo en los suelos, permitiendo asumir que debido a la altitud que sobrepasa los 3 800 m.s.n.m. y la erosión a que está sujetos estos suelos, hayan tenido influencia sobre los resultados, sobre todo en la formación abundante del coloide arcillo húmico y disminuyendo el contenido de arcillas.

Los resultados obtenidos permiten conocer que efectivamente los suelos estudiados están contaminados con cadmio, cromo y plomo, los mismos que superan ampliamente los límites de calidad ambiental (ECAs) establecidos por el MINAM (2017), debiéndose tomar medidas urgentes para evitar que la contaminación detectada no se incremente y no se convierta en un problema social al incrementarse las enfermedades producidas por la presencia de estos elementos pesados, al integrarse a la cadena alimenticia.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Poner en conocimiento de las autoridades regionales, locales y comunales del riesgo que adquieren los pobladores de la zona en estudio al sembrar sus productos alimenticios en los suelos adyacentes a la mina Antamina debido a que los niveles de contaminación tanto con cadmio, cromo y plomo superan ampliamente los límites permisibles señalados por la legislación peruana.
2. Ampliar la investigación realizada teniendo en cuenta otros metales pesados como el mercurio, arsénico y cobre, a fin de que la empresa extractora de minerales de la zona, tome de manera inmediata las medidas adecuadas para evitar la contaminación de los suelos de la zona de influencia y siga contaminándose, adquiriendo niveles mucho más graves.
3. Capacitar a los comuneros de la zona de estudio en el uso de plantas biorremediadoras con el fin de atenuar los niveles actuales de contaminación, así como incentivarlos, con el apoyo de entidades públicas y privadas, a que implementen un plan de reforestación de la zona, considerando en primer lugar especies nativas o exóticas adaptables al lugar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (2007). *Resumen de la salud pública plomo*. [ATSDR]. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.pdf
- Alloway, B. J. (2013). *Metales pesados en suelos: trazas de metales y metaloides en suelos y su biodisponibilidad* (3era ed.) Reino Unido. Recuperado de: <https://trove.nla.gov.au/version/185827190>
- Arce, S. y Calderón, M. (2017). Suelos contaminados con plomo en la Oroya - Junín y su impacto en las aguas del Rio Mantaro. *Revista Del instituto de investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 20 (40), 48-55. Recuperado de: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i40.14389>
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos y Establecen Disposiciones Complementarias. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 07 de julio de 2017, pp. 10-19.
- Avelino, C. G. (2013). *Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en Villa de Pasco*. (Tesis de Posgrado). Universidad Nacional del Callao. Recuperado de: <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/459/T.M.378.A91.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bayón, S. (2015). *Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales pesados*. (Tesis de grado). Universidad de Complutense, Madrid. Recuperado de: <https://eprints.ucm.es/47872/1/BAY%C3%93N%20SANZ%2C%20SARA.pdf>
- Belmonte, F., Rojo S., Romero, A., Moreno J. y Sarría, A. (2009). Contaminación de suelos por “metales pesados” en la sierra minera de Cartagena-La Unión y su entorno (Sureste de España). *Rev. ResearchGate*. 2, 171 – 174. Recuperado de: https://www.academia.edu/29286749/Contaminaci%C3%B3n_de_suelos_por_metales_pesados_en_la_sierra_minera_de_Cartagena-La_Uni%C3%B3n_y_su_entorno_Sureste_de_Espa%C3%B1a
- Bembibre, C. (2011). Definición de suelo agrícola. *Rev. DefiniciónABC*. Recuperado de: <https://www.definicionabc.com/medio-ambiente/suelo-agricola.php>

- Bernal, M., Clemente, R., Vásquez, S. y Walker, D. (2007). Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas*. 16 (2), 67 - 76. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/36027831.pdf>
- Cartaya, O. E., Reynaldo, I., Peniche, C. y Garrido, M. L. (2010). Empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. *Rev. Internacional de contaminación ambiental*. 27 (1), 41-46. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n1/v27n1a4.pdf>
- Castro, J. R. (2013). *Capsicum annuum L. como fitorremediadora de suelos contaminados por metales pesados*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_castro_gomez.pdf
- Catalán. G. (2016). El pH del suelo en la agricultura. *Agropal*. Recuperado de: <http://www.agropal.com/es/el-ph-del-suelo>
- Chambi, L. J., Orsag, V. y Niura, A. (2017). Evaluación de la presencia de metales pesados en suelos agrícolas y cultivos en tres microcuencas del municipio de Poopó-Bolivia. *Rev. de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. 4 (1), 67-73. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v4n1/v4n1_a09.pdf
- Chávez, L. (2014). *Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2435/T01-C517-T.pdf?sequence=1>
- Damián, M., (2009). *Concepto medioambiental*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2744/I_-_Introducci%C3%B3n_general.pdf?sequence=5#:~:text=La%20Conferencia%20de%20las%20Naciones,actividades%20humanas%E2%80%9D%2C%20citado%20en%20el
- Diez, F. J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados*. (Tesis de doctorado). Universidad de Santiago de Compostela, España. Recuperado de: https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Eróstegui, C. P. (2009). Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*. 12 (1), 45 – 46. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4260/426041218013.pdf>
- Etchevers, J. y Padilla, J. (2007). *Diagnóstico de la Fertilidad del Suelo*. En *Nutrición de Cultivos*, Alcántara, G. y Trejo, L, Coordinadores. Edición Colegio de Posgraduados, México. pp. 249-269 (440).
- Fenoll, P. (2001). Boletín de la sociedad española de mineralogía. *Rev. Europea de Mineralogía, petrología, Geoquímica y Yacimientos Minerales*. 24, 1 – 21. Recuperado de: http://www.ehu.eus/sem/BoletinSEM_pdf/Bol_Soc_Esp_Min_24_EJ.pdf
- Fernández, R. (2012). Contaminación de suelos por metales pesados. *Rev. Infoagro* Recuperado de: https://www.infoagro.com/documentos/contaminacion_suelos_metales_pesados.asp
- Galán, E. y Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla revista de la sociedad española de mineralogía*. 10, 48 – 60. Recuperado de: http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- González, I., López, M. y Galán E. (2006). Contaminación por metales en suelos agrícolas afectados por la actividad minera de sulfuros polimetálicos (Faja Pirítica Ibérica). *Macla revista de la sociedad española de mineralogía*. 6, 245 – 248. Recuperado de: http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla6/Macla6_245.pdf
- González, M. C. (2005). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamericana*, 23 (1), 29-37. Recuperado de: <https://www.ucss.edu.pe/images/fia/departamento-investigacion/reglamento-tesis-2018.pdf>
- Guerrero, L. (2011). Tecnología de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México. *Revista TESOEM*, 2 (1-80).

- Guerrero, M. E. y Pineda, V. (2016). Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá Bajo (Tausa). Modelo conceptual. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26 (1), 57-74. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v26n1/v26n1a04.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). Metodología de la Investigación. 6ta. Edición. Mc Graw Hill Educación. México. Recuperado de: <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/103etodología-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. (1ra ed.) Estados Unidos, San Diego: Academic Press. Recuperado de: <https://www.elsevier.com/books/environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348525-0>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censo Nacional*. [INEI]. Lima, Perú. Recuperado de: <https://www.inei.gov.pe/>
- Iturbe, R. (2010). *¿Qué es la biorremediación?* (1ra ed.). México, Distrito Federal. Recuperado de: http://www.dgdc.unam.mx/assets/cienciaboletto/cb_11.pdf
- La Rosa, D. A., Teutli, M. M. y Ramírez, M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Rev. Internacional de Contaminación Ambiental*. 23 (3), 129-138. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v23n3/v23n3a3.pdf>
- Larios, M. (2014). *Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb Y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del rio Turia*. (Tesis de maestría). Universidad de Lleida (ETSEA) Barcelona, España. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10261/141280>
- Lascuráin, M., List, R., Barraza, L., Díaz, E., Gual, F., Maunder, M., Dorantes, J. y Luna, V. E. (2009). Conservación de especies ex situ. *Estado de conservación y tendencias de cambio*. 2, 517-544. Recuperado de: https://www.biodiversidad.gob.mx/v_ingles/country/pdf/CapNatMex/Vol%20II/II12_Conservacion%20de%20especies%20ex%20situ.pdf
- Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados. Boletín Oficial del Estado, España, 29 de julio de 2011. pp. 1 – 52.

- Little, T. M. y Hills, F. J. (2002). *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura*. Editorial Trillas. (4ta ed.). México.
- Londoño, L. F., Londoño, P. T. y Muñoz, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 14 (2), 145 – 153. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
- Lora, R. y Bonilla, H. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Revista U.D.C.A: Actualidad y Divulgación Científica*, 13(2), 61-70. Recuperado de: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/730>
- Mahecha, J. D., Trujillo, J. M. y Torres, M. A. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, departamento del Meta. *Orinoquia*, 19 (1), 118-122. Recuperado: de <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v19n1/v19n1a11.pdf>
- Martínez, A. (2014). Minería y medio ambiente en Colombia. *Fedesarrollo*. 1 – 117. Recuperado de: https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/335/Repor_Junio_2014_Martinez.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Martínez, Z., González, M. S., Paternina, J. y Cantero, M. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Córdoba – Colombia. *Temas agrarios*. 22 (2), 20 – 32.
- Ministerio del Ambiente (2017). Decreto Supremo N° 001-2017-MINAM. Modifican el Decreto Supremo N° 006-2015-MINAM, que aprueba el Cronograma de Transferencia de Funciones de las Autoridades Sectoriales al Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles-SENACE en el marco de la Ley N° 29968. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 5 de marzo de 2017, pp 1-2.
- Montenegro, G., Fredes, C., Mejías, E., Bonomelli, C. y Olivares, L. (2009). Contenidos de metales pesados en suelos cercanos a un relave cuprífero chileno. *Agrociencia*, 43 (4), 427-435. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000400009
- Navarro, J., Aguilar, A. 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/125/0>

Observatorio de sostenibilidad. (2017). Efectos y peligros de los metales pesados presentes en el suelo. Instituto Erudite Recoge, España – [OSE].

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). Propiedades Físicas del Suelo. Recuperado de: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Cuarta edición. División de Información FAO. Roma, Italia.

Ortega, H., Benavides, A., Arteaga, R. y Zermeño, A. (2015). Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Centro de Investigación en Química Aplicada*. 1-31.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. y Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. *Nanomedicina*. 06. 1 – 108. Recuperado de: https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Pérez, J. y Gardey, A. (2010). Definición de zinc. Recuperado de: <https://definicion.de/zinc/>

Pérez, J. y Merino, M. (2017). Definición de arcilla. Recuperado de: <https://definicion.de/arcilla/>

Pinedo, J. M. (2015). *Reforestación en suelos impactadas por las actividades petroleras en la zona de canteras km 74 Shiviayacu lote IAB, en la zona de Andoas. Loreto – Perú*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Loreto, Perú. Recuperado de: http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3580/Jainer_Tesis_Titulo_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C. y Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en los suelos provocada por la industria minera. *Ecología aplicada*, 5 (1 y 2). 149-155. Recuperado: de <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v5n1-2/a20v5n1-2.pdf>

- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M. y González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista ingeniería, investigación y desarrollo*. 16 (2), 66 – 77. Recuperado de: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5447/4518
- Rodríguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*. 21 (12), 1 – 14. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n12/san122112.pdf>
- Sánchez, M. I. (2003). *Determinación de metales pesados en suelos de Mediana del Campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles de fondo y de referencia*. (Tesis doctoral). Universidad de Valladolid, España.
- Sauvé, S., Hendershot, W. y Allen, H. E. (2000). Particionamiento de metales en soluciones sólidas en suelos contaminados: dependencia del pH, la carga total de metales y la materia orgánica. *Environmental Science Technology*. 34 (7), 1125–1131. Recuperado de: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es9907764>
- Schoeneberger, P., Wysocki, D., Benham, E. y Broderson, W. (2012). *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Natural Resources Conservation Service, USDA. National Soil Center. Lincoln, USA.
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2016). Guía rápida para el levantamiento de suelos en campo. Dirección General de Política y Competitividad Forestal y de Fauna Silvestre –[SERFOR]. Recuperado de: <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/04/Gu%C3%ADaR%C3%A1pida-para-el-Levantamiento-de-Suelos-en-Campo.pdf>
- Smith, S. R. (1996). Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. *Environmental Pollution, Cab international*. 94, 241-270.
- Soil Science Society of America. (2008). Glossary of Soil Science terms. *Madison*. 38. Recuperado de: <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>
- Sotomayor, B. V. (2016). *Determinación de metales pesados en suelos aledaños a la Mina “La Platosa”, en Bermejillo, Durango*. (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/8300/BRIAND%20SOTOMAYOR%20BORROEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Stankovic, S. y Stankovic, A. R. (2013). Bioindicators of Toxic Metals. *Springer Link*. 3, 151-228. Recuperado de: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-6836-9_5
- Tiller, K. G. (1989). Heavy metals in soils and environmental significance. *Rev. Advances in Soil Science*. 9. 113 – 137. Recuperado de: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-3532-3_2
- Tirado, H. (2018). *Sistemas de drenaje en suelos saturados para la construcción de las lagunas de estabilización en la localidad de San Pedro de Lloc – provincia de Pacasmayo región La Libertad*. (Tesis de Posgrado). Universidad Nacional Federico Villareal, La Libertad, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/UNFV/2387/TIRADO%20BAZAN%20HERNAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- United States Environmental Protection Agency [EPA] (1994). Method Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. In: Test methods. SW-846. 3051, 1-14. USA.
- Valdés, J. L. (2015). Sistemas de Gestión Ambiental. Recuperado de: <http://mgdsostenible.blogspot.com/2015/01/sistemas-de-gestion-ambiental-jose-luis.html>
- Velásquez, M. J. (2003). El suelo. Ministerio de agricultura. *Portal de transparencia*. 1, 1 - 8. Recuperado de: http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/suelos/2014/suelo_cobertura.pdf
- Vera, L., Uguña, M. F., García, N., Flores, M. y Vázquez, V. (2015). Eliminación de metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad LXXIII*. 573, 43 – 49.
- Viades, J. (2012). Físicoquímica de Alimentos (1514) Coloides. 4, (1-14). Recuperado de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad4.Coloides_21732.pdf
- Volke, T., Velasco, J. A. y De La Rosa, D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. (1a ed.) México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/308419159_Suelos_contaminados_por_metales_y_metaloides_muestreo_y_alternativas_para_su_remediacion

Zapata, J. (2019) *Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura*. (Tesis para optar el grado ing. Industrial y de sistemas). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú. Recuperado de: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4052/ING_627.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zhao, L. Y., Schulin, R., Weng, L. y Nowack, B. (2007). Coupled mobilization of dissolved organic matter and metals (Cu and Zn) in soil columns. *Geochim Comsochim Acta*, 71, 3407–3418. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.554.7042&rep=rep1&type=pdf>

TERMINOLOGÍA

Medio ambiente

El medio ambiente es el conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos y sociales, capaces de causar efectos directos o indirectos, en un corto o largo plazo, sobre los seres vivos y las actividades humanas (Damián. 2009).

Antropogénico

Se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas, a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana (Lascuráin *et al.*, 2009).

Toxicología

Es la disciplina que estudia los efectos nocivos de los agentes químicos y físicos (agentes tóxicos) en los sistemas biológicos y que establece, además, la magnitud del daño en función de la exposición de los organismos vivos a dichos agentes. Se ocupa de la naturaleza y de los mecanismos de las lesiones y de la evaluación de los diversos cambios biológicos producidos por los agentes nocivos (Guerrero, 2011).

Coloides

Son soluciones de macromoléculas o bien dispersiones de moléculas pequeñas que forman agregados. Ejemplos: proteínas, hidratos de carbono (almidón, celulosa), polímeros sintéticos o naturales; dispersiones de azufre, KI, Au, óxido férrico, etc. (Viades, 2012).

Ex situ

Según el diccionario de biología, *ex situ* es relativo a la conservación de los recursos genéticos fuera de su hábitat natural, como bancos genéticos, zoológicos o centros botánicos (Lascuráin *et al.*, 2009).

In situ

Según el diccionario de biotecnología, es una expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar” y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado o una manipulación realizada en el lugar de estudio (Lascuráin *et al.*, 2009)

Mineralogía

Es la identificación de minerales y estudio de sus propiedades, origen y clasificación. Las propiedades de los minerales se estudian bajo las correspondientes subdivisiones: mineralogía química, mineralogía física y cristalografía. Las propiedades y clasificación de los minerales individuales, su localización, sus formas de aparición y sus usos corresponden a la mineralogía descriptiva. La identificación en función de sus propiedades químicas, físicas y cristalográficas recibe el nombre de mineralogía determinativa (Fenoll, 2001).

Napa freática

Es la primera capa de agua subterránea que se encuentra al realizar una perforación a la corteza terrestre, es conocida también como zona freática. Es la más susceptible a la contaminación antrópica por las actividades que realiza a diario. La napa freática está constituida por las aguas subterráneas que no son evaporadas directamente de los lagos y ríos o no es transpirada por las plantas, llegan a filtrarse a través del subsuelo y pasan a formar los acuíferos subterráneos (Tirado, 2018).

Calicata

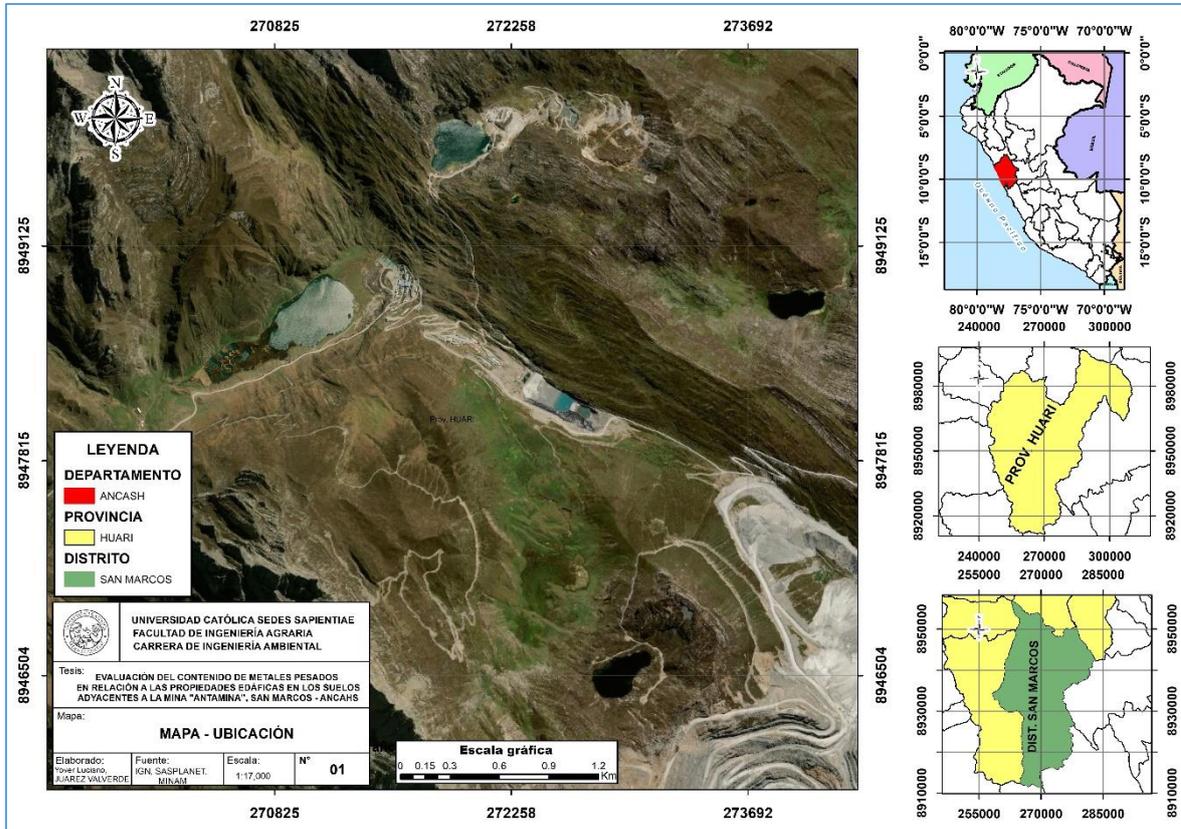
Son excavaciones en el terreno con determinadas profundidades o hasta el contacto lítico con la roca madre donde se encuentra expuesto el perfil completo del suelo. Las excavaciones se realizan normalmente con la ayuda de una herramienta de trabajo, pico o pala recta. Las calicatas se utilizan para la descripción directa y detallada del perfil del suelo. (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2016) [SERFOR], 2016).

Capa arable

Se entiende por capa arable a la capa superficial de la corteza terrestre (suelo) que el hombre puede modificar para manejar un ambiente productivo. Se puede definir también como la capa superficial sobre la cual las plantas crecen y es el lugar donde desarrollan las raíces para extraer los nutrientes para crecer, sostenerse y producir frutos (Velásquez, 2003).

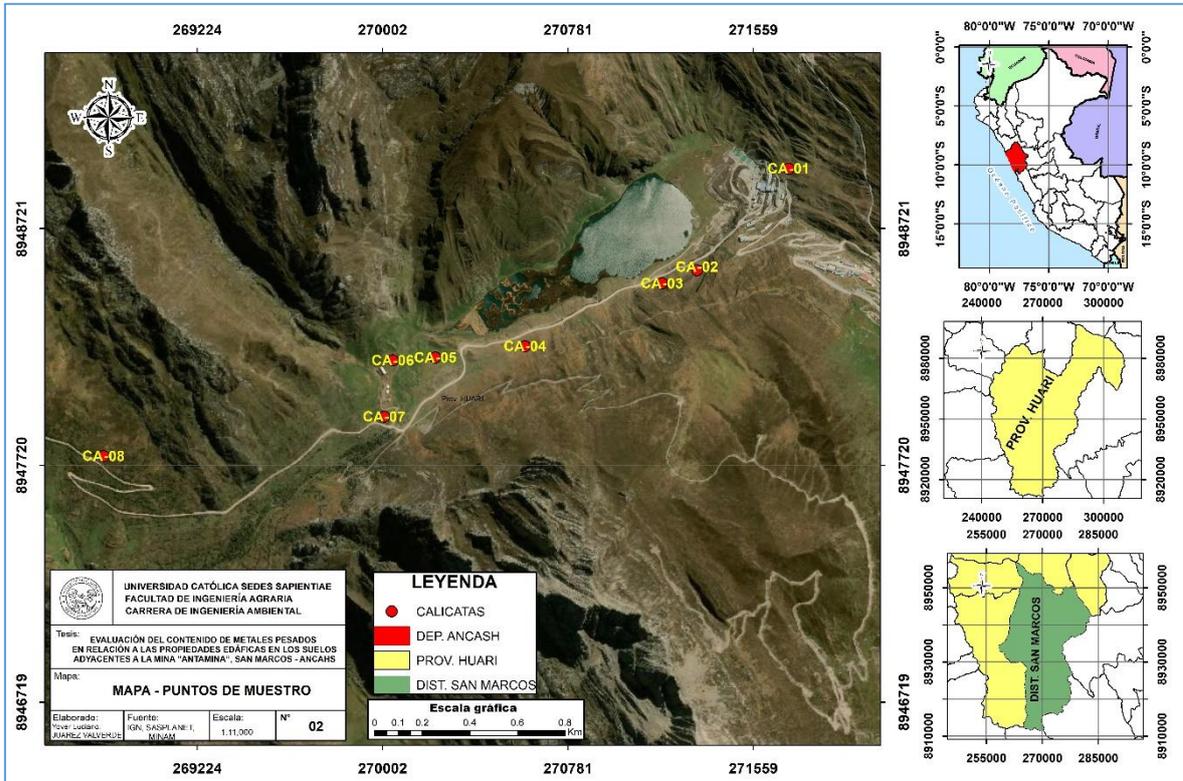
APÉNDICES

Apéndice 1. Mapa de ubicación del área en estudio



Fuente: Elaboración propia

Apéndice 2. Mapa de los puntos de muestreo



Fuente: Elaboración propia

Apéndice 3. Tablas para la interpretación de los resultados del análisis de suelos

a. Textura

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

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

b. pH

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

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

c. Conductividad eléctrica (mmhos/cm o dS.m⁻¹)

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

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

d. Materia orgánica

Definición	%	g.kg ⁻¹
Bajo	< de 2	< de 20
Medio	2 – 4	20 – 40
Alto	> de 4	> de 40

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

e. Capacidad de intercambio catiónico

Definición	Rango de CIC (me/100 g ó cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)
Muy baja	< de 4
Baja	4 – 8
Moderadamente baja	8 – 12
Moderadamente alta	12 – 20
Muy alta	> de 20

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

Apéndice 4. Estándares de Calidad Ambiental (ECAs)

Parámetros en mg/kg PS ⁽²⁾	Usos del Suelo ⁽¹⁾			Métodos de ensayo ^{(7) y (8)}
	Suelo Agrícola ⁽²⁾	Suelo Residencial/ Parques ⁽¹⁾	Suelo Comercial ⁽²⁾ / Industrial/ Extractivo ⁽⁸⁾	
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 EPA 9013
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	SEMWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015

Fuente: MINAM (2017)

Apéndice 5. Fotografías del proceso de investigación



Fotografía 1: Vista panorámica de la zona en estudio



Fotografía 2: Perfil para la toma de muestras



Fotografía 3: Construcción de calicatas para la descripción del perfil



Fotografía 4: Perfil listo para la descripción morfológica



Fotografía 5: Secado de la muestra de la capa de 20 – 60 cm



Fotografía 6: Secado de la muestra de la capa de 0 – 20 cm



Fotografía 7: Envasado de muestras para el laboratorio



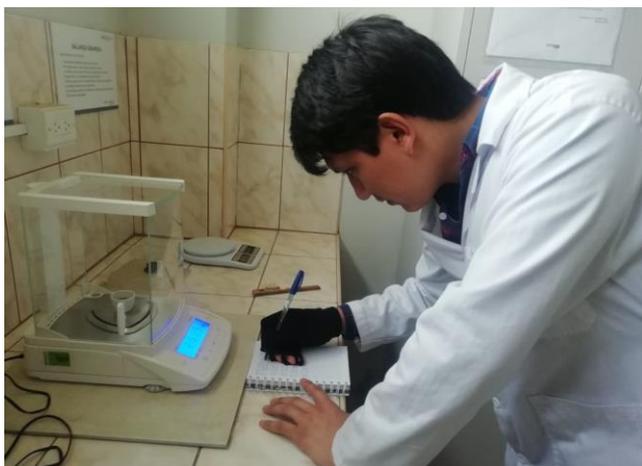
Fotografía 8: Muestras de suelo listas para ser enviado al laboratorio



Fotografía 9: Preparación de las muestras para determinar carbono orgánico



Fotografía 10: Calcinación de las muestras en la mufla



Fotografía 11: Pesaje de la muestra de suelo calcinada



Fotografía 12: Muestra de suelo calcinada en la mufla



Fotografía 13: Lectura de la conductividad eléctrica de los suelos



Fotografía 14: Muestra preparada para la medición de pH



Fotografía 15: Preparación de muestras para el análisis de metales pesados



Fotografía 16: Pesado de muestras para el análisis de metales pesados



Fotografía 17: Aplicación del extractante para el análisis de los metales pesados



Fotografía 18: Lectura de la concentración de metales pesados