

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas
contaminados con cadmio en el distrito de
Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, 2018**

Charles Francis Sánchez Tello

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas e instituciones a las cuales debo el éxito y la consolidación de este, quienes, con sus consejos, asesoramiento, el apoyo moral y económico que me dieron han sido el soporte y la inspiración para recorrer el camino hacia la finalización de este trabajo, y quisiera comenzar agradeciendo a la población del distrito de Leonor Ordoñez, por su confianza y su calidez durante la etapa de recolección de muestras.

A mis padres, Josiano Sánchez y Maruja Tello, siempre con el mayor de mis respetos, quienes a lo largo de mi vida siempre han estado a mi lado, y han sido el verdadero motor y empuje de mis proyectos y me han encaminado por el largo camino de la investigación y la curiosidad por la ciencia, dotándome siempre de todos los medios físicos y emocionales para el logro de mis objetivos.

A Silvia Sánchez, Miguel Sánchez y Alain Mendoza, mis tíos, con quienes compartí hermosos momentos de mi vida, gracias por todos sus consejos, recomendaciones y su apoyo incondicional en este periodo de estudios universitario, nunca sabré cómo pagarles el enorme apoyo que me han brindado.

A Liz Aponte, mi enamorada, quien ha sido una compañera, amiga, y sobre todo una acérrima defensora de mis proyectos, gracias por haber estado a mi lado ayudándome en este trabajo de investigación, tus recomendaciones, conocimientos y tu voluntad en hacer bien las cosas me han ayudado muchísimo.

A mi profesor y amigo Andrés Azabache Leyton, una persona siempre amable, considerada y con quien he venido desarrollando mi tesis desde el primer momento, gracias por sus consejos y por su apoyo aun cuando el trabajo era muy duro de realizar, y requería gran esfuerzo físico, siempre le estaré agradecido por su amistad y su confianza en este trabajo.

Al Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Continental y a su jefa, la Ingeniera Carmen Torres Cáceres, gracias por recibirme siempre en su despacho cuando existía alguna dificultad o necesitaba alguna recomendación, o simplemente había urgencia por avanzar la parte experimental, incluso en circunstancias fuera del horario de atención, le estaré siempre muy agradecido.

A la Bach. Jeraldine Durán Pumacahua, por su alegría y entusiasmo en el desempeño de sus labores a cargo del laboratorio de Química de la Universidad Continental; su amistad y su gran generosidad han resultado ser las condiciones ideales para el correcto desarrollo de mi investigación, le agradeceré siempre el haberme brindado una grata atención, siempre con amabilidad, respeto y muestras de apoyo hacia mi persona.

Finalmente quiero agradecer a la Bach. Cecilia Samaniego Sánchez, por su amistad, cordialidad y su gran compañerismo a lo largo de estos meses en los que realicé mis análisis de laboratorio, le estaré eternamente agradecido, pues su apoyo y su trabajo a cargo del laboratorio de Química de la Universidad Continental me han permitido lograr mis resultados, gracias por su confianza, consejos y recomendaciones.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis abuelitas, Fortunata Muñoz y Natividad Yance, mujeres trabajadoras y emprendedoras, que con gran esfuerzo, dedicación y trabajo duro han sacado adelante a nuestra familia y se han consolidado como la base de nuestra unión familiar.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria	iv
Índice.....	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	x
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
Introducción.....	xiii
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 Justificación e importancia.....	4
1.3.1 Justificación de la investigación	4
1.3.2 Importancia de la investigación	5
1.4 Hipótesis	5
1.4.1 General.....	5
1.4.2 Específicas	5
1.5 Descripción de variables.....	6
1.5.1 Variable dependiente.....	6
1.5.2 Variable independiente.....	6
CAPITULO II.....	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes del problema	8
2.2. Bases teóricas	12
2.2.1. La contaminación del suelo	12
2.2.2. El cadmio contaminante del suelo	16
2.2.2.1. Contenido en el suelo	16

2.2.2.2. Fuentes de contaminación.....	17
2.2.2.3. Reacciones.....	18
2.2.2.4. El ECA de suelos del Perú	20
2.2.3. Las propiedades fisicoquímicas de los suelos.....	21
2.2.3.1. Propiedades físicas	22
2.2.3.2. Propiedades químicas	28
2.3. Definición de términos básicos	40
CAPÍTULO III	43
METODOLOGÍA	43
3.1. Método y alcance de la investigación	43
3.1.1. Método de la investigación	43
3.1.2. Alcances de la investigación.....	45
3.2. Diseño de la investigación	47
3.3. Población y muestra	48
3.3.1. Población.....	48
3.3.2. Muestra.....	48
3.4. Técnicas de recolección de datos.....	49
3.5. Técnicas de análisis de datos	50
CAPÍTULO IV.....	51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información	51
4.1.1. Propiedades físicas de los suelos.....	51
4.1.1.1. Contenido de arcilla	51
4.1.1.2. Contenido de arena	52
4.1.1.3. Contenido de limo.....	53
4.1.1.4. Densidad aparente	54
4.1.1.5. Capacidad de campo.....	55
4.1.1.6. Porosidad total.....	56
4.1.2. Propiedades químicas de los suelos	57
4.1.2.1. pH.....	57
4.1.2.2. Conductividad eléctrica.....	59
4.1.2.3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	60
4.1.2.4. Contenido de materia orgánica (MO).....	61
4.1.2.5. Contenido fósforo disponible (mg.kg ⁻¹)	62

4.1.2.6. Contenido potasio disponible (mg.kg^{-1})	63
4.1.3. Contenido de cadmio en el suelo.....	64
4.1.4. Regresión y correlación	67
4.1.4.1. Correlación	67
4.1.4.2. Regresión	68
4.2. Discusión de resultados	72
Conclusiones.....	80
Recomendaciones.....	82
Bibliografía	83
Anexos	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables en estudio.....	7
Tabla 2. Composición elemental promedio de corteza terrestre y sedimentos	13
Tabla 3. Fuentes seleccionadas de contaminantes inorgánicos del suelo	15
Tabla 4. Concentraciones de fondo de Cd en rocas y en suelos muestreados, puntos de fuentes industriales	17
Tabla 5. Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelo.....	20
Tabla 6. Influencia generalizada de las separatas sobre algunas propiedades y comportamiento de los suelos	24
Tabla 7. Efectos esperables en el suelo en diferentes intervalos de pH	30
Tabla 8. Masa de materia orgánica e inorgánica en el metro superior de los suelos del mundo	34
Tabla 9. Métodos de análisis de suelos utilizados.....	45
Tabla 10. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de arcilla (%).....	51
Tabla 11. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de arena (%).....	52
Tabla 12. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de limo (%).....	53
Tabla 13. Medidas de tendencia central y de variación de la densidad aparente (mg.m^{-3})	54
Tabla 14. Medidas de tendencia central y de variación de la capacidad de campo (%)	55
Tabla 15. Medidas de tendencia central y de variación de porosidad total (%)	56
Tabla 16. Medidas de tendencia central y de variación del pH	57
Tabla 17. Distribución de frecuencias del pH	58
Tabla 18. Medidas de tendencia central y de variación de la conductividad eléctrica (dS.m^{-1})	59
Tabla 19. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica (dS.m^{-1})...	59
Tabla 20. Medidas de tendencia central y de variación de la capacidad de intercambio catiónico ($\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$)	60

Tabla 21. Distribución de frecuencias de la capacidad de intercambio catiónico ($\text{cmol.}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$).....	60
Tabla 22. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de materia orgánica (%)	61
Tabla 23. Distribución de frecuencias del contenido de materia orgánica del contenido de materia orgánica (%).....	61
Tabla 24. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de fósforo disponible (mg. kg^{-1})	62
Tabla 25. Distribución de frecuencias del contenido de fósforo disponible (mg. kg^{-1})	62
Tabla 26. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de potasio disponible (mg. kg^{-1})	63
Tabla 27. Distribución de frecuencias del contenido de potasio disponible (mg. kg^{-1})	63
Tabla 28. Medidas de tendencia central y de variación del contenido de cadmio (mg. kg^{-1})	64
Tabla 29. Resultados del análisis de correlación	67
Tabla 30. Análisis de variancia de la regresión entre el contenido de arena (X) y el contenido de cadmio (Y)	68
Tabla 31. Análisis de variancia de la regresión entre el contenido de arcilla (X) y el contenido de cadmio (Y)	69
Tabla 32. Análisis de variancia de la regresión entre el pH (X) y el contenido de cadmio (Y) en la capa superficial de los suelos (0 – 20 cm).....	70
Tabla 33. Análisis de variancia de la regresión entre la CE (X) y el contenido de cadmio (Y) en la capa superficial de los suelos (0 – 20 cm).....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño teórico de la investigación.....	47
Figura 2. Mapa de muestreo en el distrito Leonor Ordoñez, Jauja.....	48
Figura 3. Puntos de muestreo y clasificación de tierras por capacidad de uso mayor	49
Figura 4. Obtención de muestra de suelo individual.....	50
Figura 5. Contenido de arcilla en muestras de suelo de la capa superficial.....	52
Figura 6. Contenido de arena en muestras de suelo de la capa superficial.....	53
Figura 7. Contenido de limo en muestras de suelo de la capa superficial.....	54
Figura 8. Densidad aparente en muestras de suelo de la capa superficial	55
Figura 9. Capacidad de campo en muestras de suelo de la capa superficial...	56
Figura 10. Porosidad total en muestras de suelo de la capa superficial.....	57
Figura 11. pH en muestras de suelo de la capa superficial.....	58
Figura 12. Conductividad eléctrica en muestras de suelo	59
Figura 13. Capacidad de Intercambio Catiónico ($\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm)	61
Figura 14. Contenido de materia orgánica (%) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm)	62
Figura 15. Contenido de fósforo disponible ($\text{mg}. \text{kg}^{-1}$) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm)	63
Figura 16. Contenido de potasio disponible ($\text{mg}. \text{kg}^{-1}$) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm)	64
Figura 17. Contenido de cadmio en muestras de suelo de la capa superficial.	65
Figura 18. Regresión y correlación entre el contenido de arena y el contenido de cadmio.....	69
Figura 19. Regresión y correlación entre el contenido de arcilla y el contenido de cadmio.....	70
Figura 20. Regresión y correlación entre el pH y el contenido de cadmio.....	71
Figura 21. Regresión y correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido de Cd	72

RESUMEN

Objetivos: determinar los niveles de las propiedades físicas: arena, limo, arcilla, densidad, porosidad, y capacidad de campo; propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo y potasio; y relacionar las propiedades fisicoquímicas con el contenido de cadmio en los suelos contaminados con cadmio del distrito de Leonor Ordoñez. Se analizaron los suelos de la capa superficial en un número de 40 muestras, siguiendo lo establecido en la Guía de Muestreo de Suelos contaminados, secados al aire libre, triturados y tamizados por la malla N° 10 ASTM. Se analizaron las propiedades físicas y químicas en el Laboratorio de Calidad ambiental de la UC y el contenido de Cd en el Laboratorio de Análisis de Suelos de la UNALM, Lima. El contenido de arcilla varió entre 8 y 53%, la arena entre 12,0 y 76,5%, el limo entre 15,5 y 45,5%, la densidad aparente entre 1,03 y 1,59 mg.m^{-3} , la capacidad de campo entre 19,29 y 30,98%, la porosidad total entre 39,68 y 52,94%. El pH varió entre 7,62 y 8,31; la CE entre 0,24 y 2,67 dS.m^{-1} , la CIC entre 12,56 y 15,12 $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$, la materia orgánica entre 0,77 y 3,46%, el P disponible fue de contenido alto y el K disponible de contenido medio. Se encontró correlación y regresión significativa entre el contenido de cadmio y el contenido de arcilla, arena, pH y CE.

Palabras clave: cadmio en el suelo, contaminación del suelo, propiedades fisicoquímicas.

ABSTRACT

Objectives: to determine the levels of physical properties: sand, silt, clay, density, porosity, and field capacity; chemical properties: pH, electrical conductivity, organic matter, cation exchange capacity, phosphorus and potassium; and Relate the physico-chemical properties with the cadmium content in the cadmium-contaminated soils of the Leonor Ordonez district. The soils of the surface layer were sampled in several 40, following the provisions of the Contaminated Soil Sampling Guide, dried in the open air, crushed and sieved by the ASTM No. 10 mesh. The physical and chemical properties were analyzed in the UC Environmental Quality Laboratory and the Cd content in the UNALM Soil Analysis Laboratory, Lima. The clay content varied between 8 and 53%, the sand between 12.0 and 76.5%, the silt between 15.5 and 45.5%, the bulk density between 1.03 and 1.59 Mg.m⁻³, the field capacity between 19.29 and 30.98%, the total porosity between 39.68 and 52.94%. The pH varied between 7.62 and 8.31; EC between 0.24 and 2.67 dS.m⁻¹, CIC between 12.56 and 15.12 cmol (+). kg⁻¹, organic matter between 0.77 and 3.46%, the P Available was high content and K available medium content. A significant correlation and regression were found between the cadmium content and the clay, sand, pH and EC content.

Key words: cadmium in soil, soil contamination, physico-chemical properties

INTRODUCCIÓN

Los peligros ambientales derivados del reciente incremento de la disposición de metales pesados en los suelos, particularmente cadmio, que es altamente tóxico para humanos aún a concentraciones muy bajas, (1) ha despertado creciente preocupación en años recientes. Como otros metales pesados, el cadmio en el suelo proviene de los materiales parentales del suelo y de las actividades antropogénicas tales como efluentes de vertidos industriales y aplicaciones agrícolas de lodos, fertilizantes y pesticidas. (2)

El cadmio, proveniente de rocas parentales o de fuentes antropogénicas, puede hallarse en el suelo en diferentes formas tales como disueltos en la solución suelo, adsorbido electrostáticamente en la fracción coloidal, precipitados de carbonato y sulfato, y quelatos de materia orgánica insolubles o solubles. (2)

El destino del cadmio que llega al suelo de fuentes antropogénicas depende esencialmente de su adsorción y movilidad en el medio hospedante, que a su vez depende de propiedades del suelo como pH, y el tipo y contenido de materia orgánica y minerales de arcilla. Por lo tanto, la adsorción y movilidad del cadmio en diferentes tipos de suelo es de potencial interés para determinar la concentración de cadmio de un suelo dado y la distribución de este elemento en el perfil de suelo. Estos datos pueden ser usados para predecir el impacto ambiental de la contaminación por cadmio de fuentes antropogénicas, así como corregir políticas de gobierno en el uso y disposición de materiales conteniendo metales en suelos agrícolas. (3)

Los suelos son heterogéneos, esto causa que las propiedades varíen de un lugar a otro. (4) (5) La heterogeneidad del suelo tiene un profundo efecto sobre el transporte de contaminantes desde la superficie a la tabla de agua freática. (6)

El cadmio agregado a suelos agrícolas es retenido por adsorción a las superficies coloidales como arcillas, materia orgánica, óxidos de hierro y aluminio. La adsorción de cadmio varía entre tipos de suelo y depende de factores tales como las propiedades químicas del suelo y la composición de la solución. Esto incluye pH, arcilla, capacidad de intercambio catiónico y carbonato de calcio, (7) materia orgánica, (8) (9) textura del suelo, (10) (11) fuerza iónica de la solución suelo (12) (13) y óxidos de hierro y aluminio. (14) (15) Las personas cada vez tienen más riesgo de esta contaminación y está relacionada a la calidad de los alimentos.

La exposición de la población humana al cadmio (Cd) es un problema a la salud (16) (17) y los productos de las cosechas de los cultivos contribuyen casi con la mitad de la ingesta de Cd, por ejemplo, en Australia. Algunas de las hortalizas de hoja en la cuenca de Sidney contienen apreciables cantidades de Cd y la concentración de Cd en los suelos en granjas de hortalizas es típicamente 20 veces más que sus contrapartes no cultivadas. (18)

Son las propiedades del suelo, que presenta un suelo contaminado, las que caracterizan al sistema, diferente a otros suelos, donde no se presenta la contaminación por metales pesados.

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del estudio, planteamiento y formulación del problema.

En el Capítulo II se presenta el marco teórico, con los antecedentes del problema y las bases teóricas basadas en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

El Capítulo III comprende la metodología del estudio, habiéndose utilizado el método general de investigación hipotético-deductivo, aplicado y descriptivo.

El capítulo IV presenta los resultados y discusión, presentando los valores de las propiedades fisicoquímicas del suelo, y su discusión con los antecedentes reportados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

El cadmio (Cd) es un metal pesado presente en los suelos agrícolas, que en concentraciones altas se convierte en contaminante, pues afecta a las plantas cultivadas, a los organismos del suelo y a los seres vivos relacionados como son los animales y los humanos, alterando el normal funcionamiento del ecosistema.

Durante los últimos años, se ha incrementado el interés en relación con la acumulación de metales pesados en los ecosistemas terrestres. La contaminación del suelo, componente de los ecosistemas, se ha incrementado en el mundo y tiene un riesgo a largo plazo sobre la salud del ecosistema. El suelo puede afectar la salud humana de diferentes maneras, especialmente a través de los canales alimenticios, donde el cuerpo humano ingiere alimentos y agua que provienen de suelos contaminados. Los metales pesados, como el cadmio, pueden acumularse en el cuerpo humano y ser tóxicos. (19)

El suelo es una entidad evolutiva que se mantiene al centro de un flujo de actividades geológicas, biológicas e hidrológicas. Los cuerpos de suelo individuales sobre el paisaje y los horizontes individuales dentro del suelo son el resultado de una distribución desigual de materiales dentro y entre los suelos.

Algunos suelos y horizontes dentro de ellos se enriquecen en ciertas sustancias; otros se agotan. El flujo de agua y energía a través de la superficie del suelo penetra al interior del suelo, y crea un ambiente donde los minerales primarios se descomponen en secundarios, principalmente minerales de arcilla (meteorización). Las plantas y animales contribuyen a los procesos dentro del suelo. El horizonte mineral superficial de un suelo se enriquece conforme el carbono extractado del aire y los elementos químicos extractados desde la profundidad completa de enraizamiento son depositados sobre la superficie durante la caída de hojas o muerte de la vegetación, mientras que la parte inferior del *solum* se agota en elementos químicos extractados por las plantas. (20)

En los suelos los metales pesados y metaloides son derivados del material parental del suelo (fuente litogénica) y diferentes fuentes antropogénicas, la mayor parte de las cuales incluyen varios metaloides. Hay diferentes fuentes antropogénicas de contaminación de metales pesados que afectan los suelos agrícolas. Sin embargo, la contaminación localizada de una fuente simple predominante, tales como fundiciones pueden tener un efecto marcado sobre los suelos, la vegetación, y posiblemente también sobre la salud de la población local, especialmente en países donde hay inadecuados controles de emisión y estándares de calidad del suelo. Aunque la composición de metales pesados de los suelos agrícolas tiende a estar más cercanamente gobernado por el material parental, las entradas de fuentes tales como deposición de largas distancias, partículas de aerosoles transportados de combustibles fósiles, aplicaciones de materiales orgánicos y contaminantes en fertilizantes pueden también ser significativos. (21)

En los suelos, el cadmio puede estar enlazado por simple fuerza electrostática o íntimamente asociado con óxidos de metales, carbonatos, y materia orgánica. También se ha encontrado que el cadmio incrementa su solubilidad conforme disminuye el pH. (22) (23) Diferentes investigaciones han mostrado también que la solubilidad del cadmio depende de la capacidad de intercambio catiónico, contenido de arcilla, materia orgánica, y otros iones metálicos presentes. (24) (25)

Las reacciones que experimenta el cadmio en el suelo son diferentes para cada tipo de suelo, por lo que se requiere investigar las propiedades fisicoquímicas que presentan los suelos agrícolas contaminados con cadmio, en su horizonte superior, como línea base para elegir posteriores medidas de remediación.

1.1.2 Formulación del problema

A) Problema general

¿Qué características presentan las propiedades fisicoquímicas de los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja?

B) Problemas específicos

- ¿Qué niveles presentan las propiedades físicas: arcilla, limo, arena, densidad, porosidad, y capacidad de campo; en los suelos contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordóñez?
- ¿Qué niveles presentan las propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo y potasio; en los suelos contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordóñez?
- ¿Cómo se relacionan las propiedades fisicoquímicas con el contenido de cadmio, en los suelos agrícolas del distrito de Leonor Ordóñez?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja.

1.2.2 Específicos

- Determinar las propiedades físicas: arena, limo, arcilla, densidad, porosidad y capacidad de campo; en los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordóñez.

- Determinar las propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo y potasio; en los suelos contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordóñez.
- Relacionar las propiedades fisicoquímicas con el contenido de cadmio en los suelos contaminados con cadmio del distrito de Leonor Ordoñez.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación de la investigación

Existe una necesidad real de investigar los suelos en la medida que las técnicas de remediación obedezcan a especies cultivadas, manejos del suelo y a sus propiedades fisicoquímicas que son el resultado de los procesos de formación dominantes en un determinado lugar; estos suelos pueden ser ácidos y tener más cadmio soluble, o pueden ser alcalinos y tener compuestos de cadmio precipitados, pueden tener altos contenidos de materia orgánica y retener grandes cantidades de cadmio o bajo contenido de materia orgánica y dejar libre al cadmio en la solución suelo, entre otras variaciones; va a ser importante determinar estas características de cada propiedad físico-química en la capa de suelo de mayor actividad de raíces, donde se retiene mayor cantidad de agua, se tiene mayor cantidad de minerales, mayor actividad microbial, y es el horizonte de suelo, que permanentemente se está alterando por la labranza y otras actividades antropogénicas, además, es la capa superficial de suelo la que entra en primer contacto con las entradas que se producen al suelo, provenientes de la atmósfera, la hidrósfera, la biósfera y la propia litósfera, por lo tanto, el conocimiento de sus propiedades fisicoquímicas permitirá tener una información importante para el manejo de suelos agrícolas del distrito de Leonor Ordoñez con fines de plantear a los productores prácticas agrícolas que limiten la dispersión de contaminantes, como por ejemplo, la aplicación de materia orgánica, y evitar que este metal pesado se transfiera fácilmente a las plantas cultivadas y contamine a las personas y animales que los consumen, es por ello, que el muestreo y análisis de suelos contaminados con cadmio, tanto en el contenido total de este elemento, como en las propiedades de suelos contaminados, es una práctica que permite optimizar estas técnicas y se constituye en una base de datos para otras investigaciones en condiciones similares o diferentes del lugar de estudio.

1.3.2 Importancia de la investigación

La caracterización de los suelos agrícolas contaminados con cadmio permitirá tener la información básica para la elección de técnicas de remediación, puesto que a través del conocimiento de sus propiedades fisicoquímicas se puede diferenciar y verificar con exactitud los niveles de contaminación a los cuales han sido o vienen siendo expuestas, esto con la finalidad de que en una posterior investigación de las fuentes principales de contaminación por metales pesados en estos suelos se logren integrar medidas que disminuyan la concentración de cadmio y otros metales pesados en el suelo.

1.4 Hipótesis

1.4.1 General

Hi: los suelos contaminados con cadmio del distrito de Leonor Ordoñez presentan propiedades fisicoquímicas con caracteres diferentes.

Ho: los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordoñez no tienen variabilidad en sus propiedades fisicoquímicas.

Ha: los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el distrito de Leonor Ordoñez sí tienen variabilidad en sus propiedades fisicoquímicas.

1.4.2 Específicas

Las propiedades físicas: arcilla, limo, arena, densidad, porosidad, y capacidad de campo, presentan niveles altos, bajos y medios; en los suelos contaminados con cadmio del distrito de Leonor Ordoñez.

Las propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo y potasio, presentan niveles altos, medios y bajos; en los suelos contaminados con cadmio del distrito de Leonor Ordoñez.

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos tienen relación significativa con el contenido de cadmio, en el distrito de Leonor Ordoñez.

1.5 Descripción de variables

1.5.1 Variable dependiente

Propiedades fisicoquímicas del suelo: arena, limo, arcilla, capacidad de campo, densidad aparente, porosidad, pH, materia orgánica, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica.

Definición: relaciones físicas y químicas entre las fases sólida, líquida y gaseosa del suelo, propios para cada lugar sobre la superficie terrestre. (26)

Dimensiones: propiedades físicas y químicas.

Indicador: materia orgánica (%), limo (%), arena (%), arcilla (%), pH, P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), CIC ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$), densidad aparente ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), capacidad de campo (%), porosidad (%), conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$).

1.5.2 Variable independiente

Contenido de cadmio en suelo

Definición: el cadmio (Cd) es un elemento no esencial que está naturalmente presente en todos los suelos y se encuentra como catión divalente (Cd^{+2}) (21).

Dimensiones: concentración de cadmio total en el suelo.

Indicador: cadmio total (mg/kg)

Tabla 1.

Operacionalización de las variables en estudio

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
V.D. Propiedades fisicoquímicas del suelo	Relaciones físicas y químicas entre la fase sólida, líquida y gaseosa del suelo, propias para cada lugar sobre la superficie terrestre. (26)	Propiedades físicas y químicas	Densidad aparente (mg.m ⁻³) Porosidad total (%) Capacidad de campo (%) Limo (%) Arcilla (%) Arena (%) Materia orgánica (%) Fósforo (mg.kg ⁻¹) Potasio (mg.kg ⁻¹) CIC (cmol.kg ⁻¹) CE (dS.m ⁻¹) pH
V.I. Concentración de cadmio en el suelo	El cadmio (Cd) es un elemento no esencial que está naturalmente presente en todos los suelos y se encuentra como catión divalente (Cd ⁺²). (21)	Concentración de cadmio total en el suelo	mg Cd.kg ⁻¹ suelo

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

En el trabajo de investigación titulado: "*Correlation of Cadmium Distribution Coefficients to Soil Characteristics*", desarrollado en Dinamarca, se tuvo como objetivo determinar qué características del suelo pueden ser importantes en controlar la adsorción de cadmio. Ocho suelos de Jutland, Dinamarca, fueron muestreados según los horizontes dando un total de 49 muestras de suelo. Los suelos fueron formados en un clima templado, húmedo con un promedio de temperatura media anual de 8 °C y una precipitación promedio anual de 700 a 900 mm. Los suelos fueron secados al aire y pasados por un tamiz de 2 mm de malla antes de ser analizados. El pH fue medido potenciométricamente en una suspensión suelo:agua 1:2.5 (m/m). El contenido de carbono fue medido gravimétricamente después de la combustión seca en un aparato LECO. La CIC fue medida por el método del acetato de amonio. La distribución del tamaño de partícula fue determinada por los métodos de tamizado y pipeta, haciendo un total de 22 parámetros de suelo, medidos mediante análisis, incluyendo determinación del contenido de varios minerales en la fracción arcilla. Los parámetros de correlación fueron agrupados y el análisis de regresión reveló que el contenido de carbono orgánico fue una variable significativa en ambos valores de pH. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la gibsita fueron importantes a pH bajo (5.3) mientras que los óxidos de hierro también fueron importantes a pH alto (6.7). Ninguno de los otros

minerales de arcilla presentes en estos suelos (illita, esmectita, caolinita, minerales de arcilla interestratificados de hidróxido, clorita, cuarzo, microclina, plagioclasa) fueron significativos en explicar los coeficientes de distribución de cadmio. (27)

En el trabajo de investigación titulado: “*Spatial Variability of Grain Cadmium and Soil Characteristics in a Durum Wheat Field*”, con los objetivos de (i) caracterizar la variabilidad espacial de cadmio en granos y ocho características de suelo en un campo de trigo duro en el noreste de Dakota del Norte, (ii) desarrollar mapas de estas características y evaluar las correlaciones espaciales entre ellas, y (iii) explorar asociaciones entre estas características mapeadas y los tipos de suelo presentes. Un área rectangular de casi 0.5 ha fue seleccionada para proporcionar un rango en diferentes características del suelo que son reportadas influencian la absorción de cadmio por las plantas. Estas incluyeron cadmio extractable con quelatos, cadmio total en el suelo, pH, capacidad de intercambio catiónico, carbono orgánico, cloro, azufre y sodio soluble. La localización de los datos y las muestras pareadas de grano de trigo duro y suelo fueron colectadas en 124 lugares. Los semivariogramas mostraron que las variaciones de cadmio en grano y la mayor parte de propiedades del suelo estuvieron fuertemente dependientes espacialmente, con rangos de distancias que variaron de 30 a 55 m. Un modelo esférico fue ajustado exitosamente a los variogramas para todas las características. Los mapas de cadmio en granos y características del suelo fueron generados interpolando entre valores medidos por bloques de mallas. Comparaciones estadísticas y visuales de los mapas mostraron que el cadmio en los granos fue distribuido similarmente a las medidas de salinidad del suelo, especialmente al logaritmo de cloro en el suelo. Localidades con suelos algo pobremente drenados, que contenían elevado cloro, produjeron granos con alto contenido de cadmio. Los resultados de esta investigación sugieren que el conocimiento de la distribución espacial de las características del suelo, especialmente salinidad, podrían ayudar en desarrollar o aplicar prácticas agronómicas para reducir el cadmio en granos de trigo duro. (28)

En el trabajo de investigación titulado: “*Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation*”, tuvo como objetivo medir la variabilidad espacial y temporal de las propiedades del suelo antes y después de la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas en un suelo contaminado con elemento traza usando métodos estadísticos y geoestadísticos. El experimento se realizó en una parcela (20 x 50 m) afectada por lodo de pirita ácida tóxica de la mina Aznalcóllar (*Sevilla, Spain*) en abril 1998. Las muestras de suelo fueron colectadas de una profundidad de 0 a 15 cm dentro de 48 localidades, en una red de 14 x 45 m en los años 2002 y 2003 respectivamente. Las muestras fueron analizadas para pH, carbono orgánico total, azufre total, y concentraciones de arsénico, cadmio, cobre, plomo y zinc, total soluble y disponible. Todas las propiedades del suelo determinadas en las parcelas mostraron una gran variabilidad con altos coeficientes de variación. En ambos años, los valores promedio de concentraciones de As, Cd, Cu, Pb y Zn fueron mayores que los valores de fondo en el área. En general, la aplicación de enmiendas incrementó con el pH del suelo y carbono orgánico total y disminuyó la solubilidad de metales pesados, sin embargo, no tuvo un claro efecto sobre el contenido de elementos traza disponibles y totales. (29)

En el trabajo de investigación titulado: “*Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties*” se tuvo como objetivo investigar las relaciones entre las propiedades del suelo y las concentraciones de cadmio en granos de trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), para obtener algoritmos simples que podrían ser usados para predecir concentraciones de Cd en el grano desde las propiedades del suelo en condiciones de campo. Se colectaron y analizaron 162 muestras de granos de trigo y 215 muestras de granos de cebada, así como de sus respectivos suelos provenientes de experimentos con lodos de depuradora a largo plazo. Las concentraciones de cadmio fueron más bajas en granos de cebada que en granos de trigo bajo condiciones comparables de suelo. Los análisis de regresión múltiple mostraron que el Cd total en el suelo y el pH fueron los factores significativos que influyen las concentraciones de Cd en el grano. Se observaron diferencias significativas en cultivos en absorción de Cd para trigo y cebada. Las concentraciones de Cd en el grano de trigo podrían ser predichas

razonablemente desde el Cd total y pH del suelo usando el siguiente modelo: $\log(\text{Cd grano}) = a + b \log(\text{Cd suelo}) - c(\text{pH suelo})$, con 35% de la varianza explicada por estos factores. Los coeficientes obtenidos de los grupos de datos pareados de suelo y cultivo y de experimentos a largo plazo de aplicación de lodos fueron similares, sugiriendo que los factores similares en el control de la biodisponibilidad de cadmio en suelos enmendados y no enmendados con lodos. Para cebada, el modelo fue menos satisfactorio para predecir las concentraciones de Cd en el grano (22% de la variancia explicada). (30)

En el artículo de investigación titulado: “*Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils*”, se tuvo como objetivo determinar los efectos de la reforestación sobre las concentraciones, solubilidad y distribución de cadmio en el suelo. Comparando dos usos de la tierra con suelos de diferente textura. Se determinaron las concentraciones de cadmio en el suelo y soluciones suelo en 11 pares de perfiles de suelos daneses forestales y arables, representando tres diferentes clases texturales (arena, arena francosa y franco arenoso). El pH del suelo no cambió o disminuyó con la profundidad a través de los perfiles arables, pero incrementó con la profundidad en los perfiles forestales. El contenido significativo más alto de Cd fue hallado en los 30 cm superiores de los suelos arables comparados con los suelos forestales. Las concentraciones totales de Cd en el suelo correlacionaron con la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), contenido de arcilla, y contenido de materia orgánica, pero no con el pH del suelo. El pH de la solución suelo no cambió o disminuyó con la profundidad en los perfiles arables, pero incrementó con la profundidad en los perfiles forestales. La concentración de Cd en la solución suelo fue significativamente mayor en los suelos forestales que en los suelos arables. La concentración de Cd en la solución suelo disminuyó con el incremento de pH. Las concentraciones de Cd en el suelo y solución suelo fueron mayores en los suelos franco-arenosos comparados con los suelos arenosos y areno francosos. Se concluye que la reforestación puede incrementar las concentraciones de Cd en la solución suelo conforme disminuye el pH y CICE va disminuyendo la retención de Cd y reduciendo las concentraciones de Cd en las capas superficiales de los bosques. (31)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. La contaminación del suelo

El suelo es un recipiente primario por diseño o accidente de una gran cantidad de residuos, productos químicos y residuos en una sociedad moderna, muchos de los cuales convenientemente se han “tirado”. Cada año, millones de toneladas de productos agrícolas, domésticos e industriales han hallado su manera de entrar en los suelos del mundo. Una vez allí, ellos se hacen parte de los ciclos biológicos que afectan todas las formas de vida. (32)

Es destacable la enorme capacidad de los suelos para alojar productos químicos y orgánicos agregados. Toneladas de residuos orgánicos son descompuestas por los microbios del suelo cada año, y grandes cantidades de productos químicos inorgánicos son fijados o enlazados fuertemente por minerales del suelo. Pero también es cierto que los límites de la capacidad del suelo para adsorber estos productos, y como la calidad ambiental es afectada cuando estos límites son excedidos. (32)

Además, los procesos del suelo afectan la producción y secuestro de gases de efecto invernadero, tales como óxido nitroso, metano, y dióxido de carbono. Otros gases conteniendo azufre y nitrógeno se incorporan a la tierra por la lluvia ácida. Los proyectos de riego mal manejados en suelos de regiones áridas resultan en la acumulación de sales, incluyendo niveles tóxicos de sodio, selenio, arsénico y otros metales pesados. (32)

También, las aplicaciones de fertilizantes y abonos que dejan excesivas cantidades de nutrientes en el suelo pueden resultar en la contaminación del suelo y aguas superficiales con nitratos y fosfatos. La eutrofización de lagos, estuarios y ríos de lento movimiento es evidencia de estos nutrientes acumulados. Enormes “fábricas de animales” para producción de carne y aves de corral producen montañas de estiércol que pueden ser dispuestos sin control ambiental con productos químicos no deseados y con patógenos que son dañinos a humanos y otros animales. (32)

La concentración natural de metales pesados en los suelos depende primariamente del tipo y constitución química de los materiales parentales de los cuales se deriva el suelo. Sin embargo, las entradas antropogénicas pueden conducir a concentraciones que exceden a las fuentes naturales. (33) Las concentraciones promedio de algunos metales pesados en la superficie terrestre, en algunos sedimentos, y generalmente en los suelos, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 2.
Composición elemental promedio de la corteza terrestre y sedimentos

Elemento	Corteza	Sedimento	Pizarra	Arcilla mar	Sedimentos agua superficial	Sedimentos suspendidos de río	Arenisca	Caliza	Suelo
Hierro	4,1%	4,1%	4,7%	6,5%	6,5%	4,8%	2,9%	1,7%	3,2%
Titanio	0,6%	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,4%	0,03%	0,5%
Vanadio	160	105	130	120	145	170	20	45	108
Cromo	100	72	90	90	60	100	35	11	84
Níquel	80	52	68	250	35	90	9	7	34
Zinc	75	95	95	165	92	350	30	20	60
Cobre	50	33	45	250	56	100	30	5,1	26
Cobalto	20	14	19	74	13	20	0,3	0,1	12
Plomo	14	19	20	80	22	150	10	5,7	29
Estaño	2,2	4,6	6,0	1,5	2	-	0,5	0,5	5,8
Cadmio	0,11	0,17	0,22	0,42	-	1	0,05	0,03	0,6
Mercurio	0,05	0,19	0,18	0,08	-	-	0,29	16	0,1

Nota: solo hierro y titanio están en porcentaje, los otros elementos están en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (34)

De la Tabla 2 se puede concluir que el plomo, cadmio, estaño y mercurio son los más abundantes contaminantes metálicos introducidos en el suelo por actividades antropogénicas. La concentración promedio de cadmio en los suelos es seis veces más que la concentración promedio en la corteza terrestre. Las concentraciones de plomo, mercurio y estaño en los suelos alcanzan el doble de los valores promedio de la corteza terrestre. (33)

Para que ocurra la contaminación del suelo los metales o metaloides tienen que ser transportados desde una fuente al suelo en una localidad particular. Los principales mecanismos por los cuales los metales o metaloides pesados son transportados desde la fuente al suelo, son:

- Movimiento de corrientes de aire (viento) y deposición de polvos, partículas de tamaño de aerosol ($< 30 \mu\text{m}$) y formas gaseosas de metales (ejemplo, mercurio).
- Movimiento de agua (inundaciones de ríos y escorrentía) seguidos por deposición de metales y metaloides que contiene el suelo en pendientes bajas o en un suelo aluvial en el caso de una llanura de inundación.
- Movimiento en pendiente descendente, de rocas ricas en metales y materiales minerales contaminados, o suelo por gravedad.
- Ubicación intencional por tractores, aspersores, aspersores de abonos, camiones y movimiento de tierras de materiales conteniendo metales pesados. (21)

Hay muchas fuentes de contaminantes químicos inorgánicos que pueden ser acumulados en los suelos. La quema de combustibles fósiles, las fundiciones, y otras técnicas de procesamiento liberan a la atmósfera toneladas de estos elementos, que pueden ser arrastrados por millas y posteriormente depositados sobre la vegetación y el suelo. El plomo, el níquel, y el boro son aditivos de la gasolina que son liberados en la atmósfera y llevados al suelo a través de la lluvia y la nieve. El boro como el mineral bórax es usado en detergentes, fertilizantes, y retardantes del fuego forestal, todos los cuales comúnmente alcanzan el suelo. Los superfosfatos y la caliza, dos enmiendas ampliamente usadas en el suelo, usualmente contienen pequeñas cantidades de cadmio, cobre, manganeso, níquel y zinc. El cadmio es usado en enchapado de metales y en la fabricación de baterías. El arsénico fue usado por muchos años como un preservante de alimentos, así como un insecticida para algodón, tabaco, cultivos frutales, pastos y como un defoliante. Algunos de estos elementos mencionados son hallados como constituyentes en pesticidas orgánicos específicos y en lodos de depuradora industriales y domésticos. La contaminación localizada adicional de los suelos con metales resulta de humos de fundición de minerales, residuos industriales, y contaminación del aire. (32)

La toxicidad de contaminantes inorgánicos liberados en el ambiente cada año es ahora estimado que exceden al de las fuentes combinadas de orgánicos y radioactivos. Una parte de estas sustancias inorgánicas finaliza contaminando

los suelos. Los más grandes problemas involucran al mercurio, cadmio, plomo, arsénico, níquel, cobre, zinc, cromo, molibdeno, manganeso, selenio, fluoruro y boro. En mayor o menor grado, estos elementos son tóxicos a humanos y otros animales. El cadmio y el arsénico son extremadamente venenosos; mercurio, plomo, níquel y flúor son moderadamente venenosos; el boro, cobre, manganeso y zinc son relativamente bajos en toxicidad a los mamíferos. La Tabla 3 proporciona información sobre los usos, fuentes, y efectos de algunos de estos elementos. (32)

Tabla 3.
Fuentes seleccionadas de contaminantes inorgánicos del suelo (32)

Producto químico	Principales usos y fuentes de contaminación del suelo	Organismos principalmente dañados	Efectos en la salud humana
Arsénico	Pesticidas, desecantes de plantas, aditivos de alimentos de animales, carbón y petróleo, desechos de minería, detergentes y agua de riego	H, A, P, Av	Veneno acumulativo, cáncer, lesiones a la piel
Cadmio	Galvanoplastia, pigmentos para plásticos y pinturas, estabilizadores plásticos, baterías y fertilizantes fosfatados.	H, A, P, Av, PI	Enfermedades al corazón y riñón, fragilidad ósea
Cromo	Acero inoxidable, metales cromados, pigmentos, fábrica de ladrillos refractarios y curtido del cuero	H, A, P, Av	Mutagénico, también nutriente esencial
Cobre	Desechos de minería, cenizas en polvos, fertilizantes, polvo que contiene cobre arrastrado por el viento y tuberías	P, PI	Raro, problemas mentales, fatiga, nutriente esencial
Plomo	Combustión de aceite, gasolina y carbón; producción de hierro y acero, soldaduras en tuberías; pigmentos de pinturas	H, A, P, Av	Daño al cerebro, convulsiones
Mercurio	Pesticidas, catalizadores para polímeros sintéticos, metalúrgica y termómetros	H, A, P, Av	Daño a los nervios
Níquel	Combustión de carbón, gasolina, y aceite; fabricación de aleaciones, galvanoplastia, baterías y minería	P, PI	Cáncer al pulmón
Selenio	Formaciones geológicas con alto Se y aguas residuales de riego en los cuales el Se está concentrado	H, A, F, Av	Raro, pérdida de cabello, deformidades en las uñas, nutriente esencial
Zinc	Hierro y acero galvanizado, aleaciones, baterías, latón, fabricación de caucho, minería y neumáticos viejos	F, PI	Raro, nutriente esencial

H = humanos, A = animales, P = peces, Av = aves, PI = plantas

2.2.2. El cadmio contaminante del suelo

2.2.2.1. Contenido en el suelo

El cadmio (Cd) es un metal no esencial que está naturalmente presente en todos los suelos. El cadmio se presenta en el suelo como catión divalente (Cd^{+2}) en concentraciones que van de 0.1 – 1.0 mg/kg. Las concentraciones comunes de Cd en los suelos son algunas veces mayores que los valores originales (geogénicos) debido a los agregados históricos a través de las deposiciones atmosféricas y el uso de fertilizantes fosfatados. La concentración de Cd en el suelo representa solo una mínima fracción (10^{-4} – 10^{-6}) del total de cationes intercambiables o de los cationes en la solución suelo. Por lo tanto, la presencia de Cd es improbable que afecte la química del suelo. Contrariamente, el Cd puede afectar la función del ecosistema en niveles traza debido a su pronunciada toxicidad. Adicionalmente, la toxicidad de Cd en el suelo es persistente, no solo porque su tiempo de residencia excede décadas sino también porque su biodisponibilidad no disminuye en el largo plazo. (35)

Las concentraciones de cadmio en el suelo tienen valores promedio o mediana en diferentes escalas y lugares en el rango de 0,1 a 0,3 mg Cd.kg⁻¹ (21). Las concentraciones de Cd en suelos contaminados generalmente incrementan con la disminución del porcentaje de arena ya que el Cd está asociado con las partículas finas y, por lo tanto, la textura del suelo puede ser usada para mejorar el estimado de valores de cadmio en el suelo. (36)

Las concentraciones de Cd en el suelo que exceden 1 mg Cd.kg⁻¹ pueden ocurrir naturalmente, por ejemplo, en suelos desarrollados sobre pizarras o en suelos orgánicos. (37) Concentraciones de Cd inusuales se presentan en suelos de Jamaica (Tabla 3), donde se halló que la mediana de la concentración en el país es 4 mg Cd.kg⁻¹ y también concentraciones superiores a 900 mg Cd.kg⁻¹ (38). Los suelos altos en Cd se han hallado en suelos bauxíticos altamente meteorizados y la fuente de Cd es atribuida a la dispersión de depósitos de guano (excremento de aves marinas) que se formaron en el Mioceno Tardío o Plioceno. Las concreciones de fosforita en suelos de Jamaica contienen más de 1,1% Cd y es probable altas concentraciones en rocas fosfóricas. (39)

Tabla 4.
Concentraciones de fondo de Cd en rocas y en suelos muestreados, puntos de fuentes industriales

Fuentes	Concentraciones de Cd (mg Cd. Kg ⁻¹ suelo o roca en peso seco)	Referencias
Rocas		
- Ígneas	0,07 – 0,25	(40)
- Metamórficas	0,11 – 1,00	
- Sedimentarias	0,01 – 2,60	
Suelos		
- Europa	0,06 – 0,33 – 0,87: mínimo, media y máximo de promedio/medianas regionales.	(41)
	0,20 – 0,67 – 1,40; mínimo, media, y máximo de P90. 0,05 – 0,14 – 0,48: P10, P50 y P90, n = 840.	(42)
- USA	<0,01 – 0,20 – 0,56: P10, P50 y P90, N = 3045	(37)
- Australia	0,05 – 0,97: rango de promedios en suelos rurales	(43)
- China	0,07 (media geométrica), 0,10 (promedio); n = 3947	(44)
- Jamaica	4,0 – 78: P50 – P90	(38)

P = percentil. Mediana en negrita

2.2.2.2. Fuentes de contaminación

El cadmio es enriquecido por las actividades humanas vía deposición atmosférica y a través de aplicaciones de fertilizantes fosfatados y lodos de depuradora. El cadmio de las minas, producción, uso y disposición son una fuente neta de Cd que puede finalizar en el suelo. Más del 80% del consumo de Cd común es usado para la producción de baterías recargables (45). Otros usos tales como estabilizadores de PVC, pigmentos y enchapados han disminuido drásticamente como resultado de regulaciones ambientales. La Oficina Mundial de Estadística de Metales, (45) estimó que el consumo anual mundial de Cd fue casi 18000 toneladas en el 2008, que fue 10-20% más bajo que en 1991. El consumo de Cd aumentó en China mientras que disminuyó en los países occidentales. El uso reducido de Cd y el cambio en uso de baterías que son mayormente recicladas ha disminuido generalmente las emisiones de Cd al agua y a los lodos de depuradora en el mundo occidental. (46)

La contribución de los fertilizantes fosfatados al Cd en el suelo ha conducido lógicamente a proyectos para limitar el Cd en fertilizantes fosfatados. Un modelo de balance de masas ha sido usado para estimar concentraciones de Cd permisibles en los fertilizantes, es decir, concentraciones en las cuales estén balanceadas las pérdidas anuales a las entradas y las concentraciones de Cd en

el suelo no se incrementen posteriormente. Una evaluación utilizando el modelo de balance de masas, mostró que en 100 años de uso continuo de fertilizantes fosfatados con una relación promedio de alrededor de 140 mg Cd/kg P (60 mg Cd/kg P₂O₅), podría incrementar el Cd en el suelo en 20%. Esto podría incrementar el Cd en los canales alimenticios en casi el mismo factor si es que no se observa una fijación pronunciada de Cd. (47)

2.2.2.3. Reacciones

El suelo es un sistema tridimensional compuesto principalmente de un componente en estado sólido además de otros dos componentes, la fase líquida y la fase gaseosa. Los metales pesados pueden tener, según la condición física y forma química del metal o sus compuestos que pueden formar, un importante efecto sobre cualquiera de estas fases. (33)

La interacción de metales con la fase sólida no ocurre aisladamente de la fase líquida, para el pH, junto con otras propiedades del agua del suelo, la solución controlará la adsorción sobre la superficie sólida y la factibilidad de reacciones químicas dentro del sistema. En términos concretos, la interacción de metales pesados con el estado sólido será dentro del marco de los siguientes procesos:

- **Adsorción:** la adsorción en el sistema suelo depende principalmente de los parámetros fisicoquímicos, especialmente el pH y el adsorbente de metal. De tal manera que el mineral de arcilla en general adsorberá menos cantidad de metales que materiales óxidos y orgánicos. La materia orgánica disuelta puede incrementar la solubilidad del metal y activar la superficie del mineral reactivo, favoreciendo así la adsorción.
- **Difusión:** los iones metálicos son capaces de difundir dentro del suelo en dosis que depende de su diámetro iónico, así como el pH prevalente del medio. Sin embargo, el incremento en pH puede conducir a la formación de hidroxicomplejos que podría causar un incremento de los diámetros iónicos, disminuyendo así la tasa de difusión y por lo tanto inmovilizar los metales pesados que van a difundir.

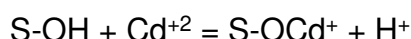
- **Formación de complejos:** los iones metálicos pueden ser coordinados a sustancias orgánicas del suelo, en particular ácidos húmicos y fúlvicos. (33)

El cadmio en los suelos está casi invariablemente presente en el suelo en el estado de oxidación Cd(II). No es un metal de transición. Participa en enlaces covalentes con superficies adsorbentes y, por lo tanto, es menos soluble que cationes como el Ca^{+2} . (21)

Las concentraciones de Cd en soluciones suelo no contaminadas (Cd total ~ 0.2 mg Cd/kg) en el rango de pH neutro es $< 0.1 - 5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. (48) Esto significa que solo una pequeña fracción del Cd total está presente en la solución suelo y la pérdida anual de Cd por lixiviación son generalmente imperceptibles. El mecanismo de enlace preciso de Cd en el suelo es casi imposible detectar con técnicas espectroscópicas comunes en concentraciones ambientalmente relevantes. Por lo tanto, los datos de solubilidad o extracción química son usados para inferir indirectamente el mecanismo de enlace de cadmio. Se ha sugerido que la adsorción y no la precipitación controlan el Cd en solución en concentraciones ambientalmente relevantes en el suelo ($0.1 - 10$ mg/kg); el Cd en solución incrementa casi proporcionalmente a la adición de Cd, mientras que las reacciones de precipitación podrían inferir las constantes de concentración en solución con el incremento de adiciones de Cd (49). La precipitación es improbable que controle la solubilidad del Cd a menos que sea excesiva la contaminación de Cd y el pH sea mayor de 7.0. Por ejemplo, el producto de solubilidad del CdCO_3 ($K_{ps} = 10^{-12}$), la forma de Cd posiblemente más insoluble en suelos aeróbicos predice que el Cd precipita en suelos calcáreos a pH 8.5 solo sobre $55 \mu\text{g Cd}^{+2}\cdot\text{L}^{-1}$. Las reacciones de adsorción y complejación en solución en un suelo reducen típicamente el Cd^{+2} a ese pH a $< 10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para los suelos que tengan 10 mg Cd/kg. Esto significa que las concentraciones de Cd en el suelo deberían exceder > 100 mg Cd/kg para que esta reacción de precipitación pueda presentar valores muy superiores al rango de concentraciones de Cd en el suelo. (21)

La materia orgánica del suelo, los oxihidróxidos de Fe, Al y Mn y los minerales de arcilla son los tres principales adsorbentes de Cd en el suelo. Los

protones son los principales cationes que compiten por la adsorción de Cd en la materia orgánica u oxihidróxidos debido al enlace del Cd⁺² a átomos de oxígeno superficiales de grupos carboxílicos o fenólicos de sustancias húmicas o a grupos hidroxil superficiales en oxihidróxidos. Una ecuación de adsorción general podría ser:



En donde S-OH es el grupo hidroxil superficial. Esta ecuación simplificada predice que el incremento de H⁺ disminuye drásticamente la adsorción. Las constantes de adsorción de Cd⁺² para ácidos húmicos (la fase adsortiva principal de la materia orgánica del suelo) y de los hidróxidos de Fe ilustran que los órdenes de magnitud del Cd⁺² son más selectivos que el Ca⁺². La selectividad Cd⁺²/Ca⁺² para la adsorción en minerales de arcilla es típicamente menos de 5 en condiciones normales (50), por lo tanto, es poco probable que los minerales de arcilla sean importantes adsorbentes para el Cd en la mayoría de los suelos. Los modelos de especiación predicen que la mayor parte del Cd está enlazado a la materia orgánica en los suelos con pH < 6.5 mientras que los óxidos de Fe son los más importantes constituyentes adsorbentes a pH > 6.5. (51)

2.2.2.4. El ECA de suelos del Perú

Mediante Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, el Ministerio del Ambiente del Perú, aprobó los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, que constituyen un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, con lo cual se deroga el Decreto Supremo N° 022-2013-MINAM, que aprobaba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, y el Decreto Supremo N° 003-2014-MINAM, que establecía el procedimiento de adecuación de los instrumentos de gestión ambiental a nuevos Estándares de Calidad Ambiental (ECA). (52)

Tabla 5.
Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelo (52)

Parámetro en mg/kg PS ⁽²⁾	Usos del suelo ⁽¹⁾			Métodos de Ensayo ^(7,8)
	Suelo Agrícola ⁽³⁾	Suelo Residencial/ Parques ⁽⁴⁾	Suelo Comercial ⁽⁵⁾ /Industrial/ Extractivo ⁽⁶⁾	
Inorgánico				
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051

- (1) **Suelo:** material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.
- (2) **PS:** peso seco
- (3) **Suelo agrícola:** suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas.
- (4) **Suelo residencial/parques:** suelo ocupado por la población para construir sus viviendas, incluyendo áreas verdes y espacios destinados a actividades de recreación y de esparcimiento.
- (5) **Suelo comercial:** suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla está relacionada con operaciones comerciales y de servicios.
- (6) **Suelo industrial/extractivo:** suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y la elaboración, transformación o construcción de bienes.
- (7) Métodos de ensayo estandarizados vigentes o métodos validados y que cuenten con la acreditación nacional e internacional correspondiente, en el marco del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de la International *Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC). Los métodos de ensayo deben contar con límites de cuantificación que estén por debajo del ECA correspondiente al parámetro bajo análisis.
- (8) Para aquellos parámetros respecto de los cuales no se especifican los métodos de ensayo empleados para la determinación de las muestras, se deben utilizar métodos que cumplan con las condiciones señaladas en la nota. (7)

2.2.3. Las propiedades fisicoquímicas de los suelos

Desde el punto de vista de las interacciones potenciales con diferentes contaminantes, los constituyentes de la fase sólida del suelo deberían ser agrupados según su área superficial. El destino de los contaminantes es

afectado por todos los componentes de la fase sólida del suelo. Sin embargo, los constituyentes del suelo con baja área superficial podrían afectar principalmente el transporte de los contaminantes como solutos, como inmiscibles con agua o como vapores. La fase sólida del suelo puede también indirectamente inducir la degradación de los contaminantes orgánicos en el suelo, a través de sus efectos en la relación agua/aire y, consecuentemente, sobre la actividad biológica del suelo. El grupo de constituyentes con alta área superficial controla, además del transporte de contaminantes, su retención, y liberación sobre y desde la superficie, así como su degradación química inducida por la superficie. Es, por lo tanto, natural, que cuando se trate con el tópico de contaminación del suelo, deberían enfatizarse los constituyentes sólidos, que determinan las principales propiedades fisicoquímicas del suelo, caracterizados por su gran área superficial, y estas son las arcillas y los complejos arcillo-orgánicos. (53)

2.2.3.1. Propiedades físicas

La textura

La textura es el término referido al tamaño y organización de las partículas del suelo. Las partículas del suelo, conocidas como separatas del suelo, pueden ser descritas, según su tamaño, como componentes del suelo (menores de 2 mm en diámetro). Los suelos pueden ser clasificados según su textura en diferentes clases dependiendo de su relación de arena: limo: arcilla. (33)

Las fracciones granulométricas, arena, limo y arcilla, constituyen una característica estable y puede considerarse una determinación básica en el suelo. El interés de conocer la granulometría reside en que permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo:

- Capacidad de retención de agua disponible para las plantas y de suministro
- Facilidad para la circulación del agua
- Facilidad para el laboreo
- Riesgo de formación de sellado y de costra superficial
- Riesgo de erosión hídrica
- Riesgo de erosión eólica

- Capacidad de almacenar nutrientes
- Capacidad de admitir aguas residuales, purines y otros residuos líquidos
- Orden de magnitud de la superficie específica (54)

Cuando las partículas del suelo disminuyen en tamaño, el área superficial específica y las propiedades relacionadas incrementan grandemente. Las arcillas coloidales finas tienen casi 10 000 veces más área superficial como el mismo peso de la arena de tamaño medio. La textura del suelo influencia muchas otras propiedades en formas de largo alcance como resultado de cinco fenómenos superficiales:

- Además de las cantidades pequeñas de agua retenidas en los pequeños poros del suelo, el agua es también retenida en los suelos como películas delgadas sobre la superficie de partículas del suelo. A mayor área superficial mayor será la capacidad del suelo para retener películas de agua.
- Los productos químicos disueltos y gases son atraídos y adsorbidos por las superficies de partículas minerales. A mayor área superficial, mayor será la capacidad del suelo para retener nutrientes y otros productos químicos.
- La meteorización toma lugar en la superficie de partículas minerales, liberando elementos constituyentes a la solución suelo. A mayor área superficial, mayor será la tasa de liberación de nutrientes de las plantas desde los minerales meteorizables.
- La superficie de las partículas minerales, frecuentemente tienen cargas electromagnéticas positivas y negativas, de tal manera que las superficies de las partículas y las películas de agua entre ellas tienden a atraerse unas a otras. A mayor área superficial, mayor será la tendencia de las partículas del suelo a unirse en una masa coherente, o como agregados discretos.
- Los microorganismos tienden a crecer y colonizar superficies de partículas. Por esta y otras razones, las reacciones microbiales en los suelos son mayormente afectadas por el área superficial específica. (32)

Tabla 6.
Influencia generalizada de las separatas sobre algunas propiedades y comportamiento de los suelos (32)

Propiedad/comportamiento	Calificación asociada con las separatas del suelo		
	Arena	Limo	Arcilla
Capacidad de retención de agua	Bajo	Medio a alto	Alto
Aireación	Buena	Medio	Pobre
Tasa de drenaje	Alto	Lento a medio	Muy lento
Nivel de materia orgánica	Bajo	Medio a alto	Alto a medio
Descomposición de materia orgánica	Rápido	Moderado	Lento
Calentamiento en primavera	Rápido	Moderado	Lento
Compactación	Bajo	Medio	Alto
Susceptibilidad a erosión eólica	Moderado	Alto	Bajo
Susceptibilidad a erosión hídrica	Bajo	Alto	Alto (si está agregado)
Potencial de contracción-dilatación	Muy bajo	Bajo	Moderado a muy alto
Sellado de estanques presas y vertederos	Pobre	Pobre	Buena
Idoneidad para labranza después de la lluvia	Buena	Medio	Pobre
Potencial de lixiviación de contaminante	Alto	Medio	Bajo
Habilidad para almacenar nutrientes	Pobre	Medio a alto	Alto
Resistencia al cambio de pH	Bajo	Medio	Alto

Dentro de los tres amplios grupos de suelos francos, arcillosos y arenosos, los nombres de las clases texturales específicas transmiten una idea más precisa de la distribución del tamaño de partículas y de la naturaleza general de las propiedades físicas del suelo. Las relaciones entre los nombres de las clases texturales y las proporciones de arena, limo y arcilla comúnmente se muestran diagramáticamente como un gráfico triangular. (32)

La densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo se define como la masa por unidad de volumen. Este volumen es el que ocupa la muestra en el campo. La densidad aparente tiene interés desde el punto de vista del manejo del suelo, ya que informa sobre la compactación de cada horizonte, y permite inferir las dificultades para la emergencia, el enraizamiento y la circulación del agua y del aire. La densidad aparente está directamente relacionada a la estructura y por ello depende de los mismos factores de control. El conocimiento del valor de la densidad aparente resulta indispensable para referir, a un volumen de suelo en el campo, los resultados de los análisis de laboratorio. (54)

Los suelos con una alta proporción de espacio poroso a sólidos tienen más baja densidad de volumen que aquellos que son más compactos y tienen menos espacio poroso. Consecuentemente, cualquier factor que influya en el espacio poroso del suelo afectará la densidad de volumen. (32)

Los suelos de textura fina tales como francos limosos, arcillosos, francos arcillosos, generalmente tienen bajas densidades de volumen que los suelos arenosos. Esto es verdad, debido a que las partículas sólidas de los suelos de textura fina tienden a estar organizadas en gránulos porosos, especialmente si está presente una adecuada cantidad de materia orgánica. En estos suelos agregados, los poros existen entre y dentro de los gránulos. Sin embargo, en suelos arenosos, el contenido de materia orgánica generalmente es bajo, las partículas sólidas son menos probables a estar agregadas, y las densidades de volumen son comúnmente altas que en los suelos de textura fina. (32)

La densidad aparente es un dato del que, con frecuencia, se dispone para los distintos horizontes de un suelo, por la relativa facilidad con que se puede determinar, incluso si solo se cuenta con el apoyo de un laboratorio muy básico. No obstante, cabe destacar que el valor de la densidad aparente presenta limitaciones importantes, ya que no proporciona información acerca del tamaño de los poros, ni sobre la conexión entre ellos, ni sobre las fuerzas que han dado lugar a una estructura específica. Estos aspectos son de importancia para poder predecir el movimiento del agua en los poros de un suelo y los riesgos de degradación de los agregados. Suelos con los mismos valores de densidades aparentes pueden tener distinta respuesta a fuerzas externas. Para obtener información de este carácter habrá que recurrir a estudios específicos sobre la porosidad. (54)

La porosidad del suelo

Una de las principales razones para medir la densidad de volumen del suelo es que el valor puede ser usado para calcular el espacio poroso. Para suelos con la misma densidad de partícula, a más baja densidad de volumen, más alto será el espacio poroso total. (32)

Para un suelo "ideal" de textura media, bien granulado en su capa superficial en buena condición para el crecimiento de la planta, aproximadamente el 50% del volumen del suelo consistiría en espacio poroso, y el espacio poroso podría ser casi la mitad llenado con aire y la otra mitad llenado con agua. Realmente, la porosidad total varía ampliamente entre los suelos por las mismas razones que varía la densidad de volumen. Los valores van desde los más bajos como 25% en subsuelos compactados a más de 60% en la superficie de los suelos altos en materia orgánica, y bien agregados. Como es el caso de la densidad de volumen, el manejo puede ejercer una decidida influencia sobre el espacio poroso de los suelos. Los datos de un amplio rango de suelos mostraron que el cultivo tiende a bajar el espacio poroso total comparado al de los suelos no cultivados. Esta reducción usualmente está asociada con una disminución en el contenido de materia orgánica y una consecuente disminución de la granulación. (32)

El tamaño de grano y el volumen de poros son los más importantes factores que controlan la percolación del agua y la ventilación dentro del suelo. La porosidad, como una medida del porcentaje de volumen de espacio poroso con respecto al volumen total, puede ser indirectamente calculada usando la siguiente ecuación (33):

$$Porosidad = 1 - \frac{\text{densidad de volumen}}{\text{densidad de partícula}} \times 100$$

Intrínseca a la porosidad es la distribución del tamaño de poros; un parámetro físico muy importante, que se encuentra en relación directa a la retención de agua y propiedades relacionadas como drenaje y aireación de un suelo dado, y por lo tanto para su productividad agrícola. (33)

La capacidad de campo

Una vez que el riego o la lluvia ha cesado, el agua en los poros más grandes drenará descendientemente en respuesta a la gradiente hidráulica (mayormente la gravedad). Después de uno, dos o tres días, este rápido movimiento descendente será imperceptible conforme las fuerzas mátricas

juegan un rol mayor en el movimiento del agua remanente. Entonces, se dice, el suelo está a capacidad de campo. En esta condición, el agua se ha movido fuera de los macroporos y el aire se ha movido para tomar su lugar. Los microporos o poros capilares aún están llenos con agua y pueden suministrar el agua necesaria a las plantas. El potencial mátrico variará ligeramente de suelo a suelo, pero generalmente estará en el rango de -10 a -30 kPa, asumiendo un drenaje en una zona menos húmeda de porosidad similar. (32)

Comúnmente se considera a la capacidad de campo como la humedad retenida por el perfil de un suelo uniforme mojado que prácticamente ha dejado de drenar sobre suelo seco. Por lo general, el tiempo para este drenaje después de la aplicación de agua es de 2 a 3 días. La estratificación o un nivel freático superficial puede afectar el valor de la capacidad de campo de un perfil. La mejor forma de valorar todos estos efectos es con una evaluación directa en el campo donde es conveniente determinar la distribución de agua en el perfil después de la infiltración para este fin. También es común encontrar que, aunque la humedad de la capacidad de campo en un perfil profundo corresponde al valor de humedad equilibrada a una succión de 1/3 bar en la olla de presión, la succión medida directamente en el campo es algo menor. (55)

Mientras toda el agua del suelo es afectada por la gravedad, el término agua gravitacional se refiere a la proporción de agua del suelo que se drena fácilmente entre los estados de máxima capacidad retentiva y capacidad de campo. La mayor parte de la lixiviación del suelo ocurre como agua gravitacional que drena de poros más grandes antes de alcanzar la capacidad de campo. Por lo tanto, el agua gravitacional incluye gran parte del agua que transporta productos químicos como iones nutrientes, pesticidas, y contaminantes orgánicos dentro del agua freática, por último, en ríos y arroyos. (32)

La capacidad de campo es un término muy útil debido a que se refiere a un grado aproximado de humedad del suelo en el cual varias propiedades importantes del suelo están en transición:

- A capacidad de campo, un suelo está reteniendo la máxima cantidad de agua útil para las plantas. El agua adicional, mientras se mantenga con baja energía de retención, podría ser de uso limitado para las plantas debido a que permanecería en el suelo por un corto tiempo antes de ser drenado, y, mientras en el suelo, ocuparía los poros grandes, reduciendo de este modo la aireación del suelo. El drenaje del agua gravitacional del suelo es generalmente un requisito para el óptimo crecimiento de las plantas.
- A capacidad de campo, el suelo está cerca de su límite plástico, que es, el comportamiento del suelo como un semisólido desmenuzable con contenidos de agua por debajo de la capacidad de campo, y como un material plástico tipo masilla que se convierte fácilmente en lodo con contenidos de agua por encima de la capacidad de campo. Por lo tanto, la capacidad de campo se aproxima al límite superior de suelo húmedo para una fácil labranza o excavación.
- A capacidad de campo, hay suficiente espacio poroso lleno de aire para permitir la óptima aireación para la mayor parte de la actividad microbial aeróbica y para el crecimiento de la mayoría de las plantas. (32)

2.2.3.2. Propiedades químicas

Basado en su composición química y el grado de explotación agrícola, los suelos pueden tener ciertas propiedades químicas, que no son solo diagnósticas para su origen y parámetros ambientales, sino también indicadores muy sensitivos del valor de su uso. Los más destacados de estos son el grado de acidez (pH), junto con el intercambio iónico y la capacidad de adsorción de cationes, que son factores muy importantes para el potencial del suelo y para la nutrición de las plantas. Estas propiedades están cercanamente relacionadas unas a otras. (33)

Reacción del suelo

El pH o reacción del suelo es usualmente medida en una suspensión estándar de 1:1; 1:2 o 1:2.5 (peso a volumen) de suelo y agua destilada, o en una solución diluida de cloruro de calcio (0,01 M). La acidez del suelo está cercanamente relacionada a las propiedades de intercambio iónico del suelo, y a otras propiedades, como el contenido de materia orgánica y mineralogía de

arcillas del suelo. También tiene una relación directa a la disponibilidad de metales en la medida que afecta su solubilidad y su capacidad para formar quelatos en el suelo. En este sentido, los iones Al^{+3} juegan un rol muy importante en controlar la concentración de iones de hidrógeno en el agua del suelo, y por lo tanto el nivel de acidez (pH). (33)

El grado de acidez del suelo o alcalinidad, expresado como pH, es una variable principal que afecta un amplio rango de propiedades físicas o químicas del suelo. Esta variable química mayormente influencia la probabilidad que las raíces de las plantas puedan absorber nutrientes y elementos tóxicos. El pH del suelo tiene también impacto pronunciado sobre las comunidades de organismos del suelo y sus actividades. La mezcla de especies de plantas que domina un paisaje en condiciones naturales frecuentemente refleja el pH del suelo. (32)

El pH del suelo afecta la movilidad de muchos contaminantes en el suelo influyendo la tasa de su descomposición bioquímica, su solubilidad, y su adsorción a los coloides. Así, el pH del suelo es un factor crítico en predecir la probabilidad que un contaminante contamine la capa freática, aguas superficiales, y canales alimenticios. Además, hay ciertas situaciones en que se genera tanta acidez que el ácido mismo se convierte en un contaminante ambiental significativo. Por ejemplo, los suelos en ciertos tipos de tierras alteradas generan agua de drenaje extremadamente ácida que puede causar muerte masiva de peces cuando alcanza un lago o una corriente. (32)

Muchos factores complejos afectan el pH del suelo, pero ninguno más que dos balances simples: el balance entre cationes ácidos y no ácidos sobre las superficies coloidales y el balance entre iones H^+ y OH^- en la solución suelo. Estos balances, a su vez, son mayormente controlados por la naturaleza de los coloides del suelo. Por lo tanto, para comprender y manejar la acidez del suelo, es esencial tener una buena comprensión de los conceptos de superficies coloidales cargadas e intercambio de cationes. También, inextricablemente unido a la acidez del suelo es la toxicidad del elemento no nutriente, el aluminio. (32)

Contrariamente, la lixiviación es mucho menor en regiones secas, permitiendo a los suelos retener Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , y Na^+ para prevenir la acumulación de cationes ácidos. Por lo tanto, los suelos en regiones áridas y semiáridas tienden a tener niveles de pH alcalinos (es decir, $\text{pH} > 7,0$), algunas veces acompañado por altos niveles de sales solubles y sodio intercambiable. (32)

Los principales efectos esperables para distintos intervalos de pH son los siguientes (54):

Tabla 7.
Efectos esperables en el suelo en diferentes intervalos de pH (54)

pH	Evaluación	Efectos esperables en el intervalo
< 4,5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al^{+3} y Mn^{+2}
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	Exceso: Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Deficiencia: Ca, K, N, Mg, Mo, P, S. Suelos sin carbonato cálcico. Actividad bacteriana escasa.
5,6 - 6,0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes
6,6 - 7,3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos
7,4 - 7,8	Medianamente básico	Suelos generalmente con CaCO_3
7,9 - 8,4	Básico	Disminuye la disponibilidad de P y B. Deficiencia creciente de: Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Suelos calizos. Clorosis férrica debida al HCO_3^-
8,5 - 9,0	Ligeramente alcalino	En suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse al MgCO_3 , si no hay sodio intercambiable.
9,1 - 10	Alcalino	Presencia de carbonato sódico.
>10,0	Fuertemente alcalino	PSI > 15. Movilidad de P como Na_3PO_4 . Actividad microbiana escasa. Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo.

La acidez y la basicidad del suelo afectan a sus diversas propiedades, a su comportamiento y al crecimiento de las plantas (54):

- **Propiedades físicas afectadas**

Dispersión – floculación de los coloides: lixiviación

Estructura

Porosidad y aireación

Conductividad hidráulica

Régimen de humedad y temperatura

- **Propiedades químicas afectadas**

Meteorización química

Movilidad de elementos tóxicos: Al, Mn y metales pesados

Biodisponibilidad

Disponibilidad de nutrientes

Descomposición de la materia orgánica

Adsorción de aniones: fosfatos, sulfatos, cloruros

Procesos de hidromorfismo

Neoformación de minerales de arcilla

- **Propiedades biológicas afectadas**

Relaciones bacterias – hongos

Población bacteriana

Nodulación de leguminosas

Humificación

Fijación de nitrógeno

Movilidad y absorción de nutrientes

La capacidad de intercambio de cationes

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es el total de cationes intercambiables que un suelo puede retener a un pH especificado. Los componentes del suelo que contribuyen a la CIC son la arcilla y la materia orgánica, y en una menor extensión, el limo. (56) (57) En cualquier suelo, el número de sitios de intercambio es dependiente del pH del suelo; tipo, tamaño y cantidad de arcilla; y cantidad, estado de descomposición, y fuente del material orgánico. (58) (59) (60) (61) (62)

La CIC de los principales coloides del suelo evidencia grandes diferencias de unos a otros debido al distinto origen de la carga y, para un mismo cambiador, la amplitud del intervalo de valores se debe a los múltiples factores que influyen en la aparición de la carga: tamaño de las partículas, cristalinidad y tiempo de tratamiento. Para el caso de la materia orgánica la gran disparidad de valores se debe al distinto grado de descomposición-humificación que puede presentar. (54)

La CIC de un suelo está fuertemente afectada por la naturaleza y cantidad de minerales de arcilla y materia orgánica presentes en el suelo (Cuadro 1).

Suelos con predominancia de minerales 2:1 tienen mayor CIC que suelos con minerales predominantemente 1:1. Suelos con alto contenido de arcilla y materia orgánica tienen alta CIC que suelos arenosos y bajos en materia orgánica. Los valores típicos de CIC para diferentes texturas del suelo son como sigue (63):

Arenosos (ligeramente coloreados)	: 3 a 5 cmol.kg ⁻¹
Arenosos (oscuros)	: 10 a 20 coml.kg ⁻¹
Francos	: 10 a 15 cmol.kg ⁻¹
Franco limosos	: 15 a 25 cmol.kg ⁻¹
Arcillosos y francos arcillosos	: 20 a 25 cmol.kg ⁻¹
Suelos orgánicos	: 50 a 100 cmol.kg ⁻¹

Las cargas superficiales que presentan los minerales de arcilla y los componentes orgánicos, responsables de la adsorción de cationes, pueden tener su origen en (54):

- La estructura del mineral, en este caso: su cantidad es independiente de las condiciones del medio, en concreto del pH, por lo que se denominan cargas permanentes. Son debidas a sustituciones isomórficas. La magnitud de la fuerza electrostática en la superficie del mineral dependerá de si la sustitución isomorfa se halla en la capa tetraédrica o en la octaédrica, según expresa la ley de Coulomb. Suelen ser negativas, si bien en algunos casos son positivas, como en las cloritas.
- Roturas en los bordes y en los grupos funcionales: dependen de las condiciones de pH (cargas variables).

- **En componentes minerales**

Se trata de cargas localizadas en los bordes del mineral, en los que se producen las roturas, caso de las caolinitas. También se presentan en óxidos, oxihidróxidos, alófana e imogolita.

Los grupos OH pueden: disociarse en medios básicos, lo que genera carga negativa en la superficie del mineral.

Unirse a iones H^+ en medio ácido, lo que permite que el mineral presente cargas positivas en sus bordes.

- **En componentes orgánicos**

La disociación y la unión con iones H^+ afecta a los grupos funcionales hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), fenólico (-C₆H₄OH) y amina (-NH₂) de los componentes orgánicos.

Al analizar la predicción de la CIC a partir de arcilla y carbono orgánico en algunos suelos de la India, ricos en esmectita y caolinita, encontró que en suelos donde predomina esmectita, el carbón orgánico contribuyó mínimamente a la CIC del suelo, mientras que la arcilla contribuyó grandemente (93,3 a 100%). (57) Estos hallazgos concuerdan con los de Black, (64) quien mostró que la CIC de los suelos es dependiente de la naturaleza y cantidad de la fracción arcillosa de los suelos debido a la disminución en tamaño de partícula e incremento en superficie específica. En suelos caoliníticos fue el carbono orgánico el que contribuyó mayormente a la CIC. La contribución de la arcilla varió de 13,3% a 66,0%, siendo esta cada vez menor conforme se incrementaba el contenido de carbono orgánico. Por otro lado, la contribución del carbono orgánico incrementó con su contenido, variando de 34% a 85%.

La materia orgánica

Los suelos se forman, por lo general, a partir de materiales originarios sin materia orgánica. La materia orgánica fresca (biomasa muerta o necromasa) procedente de plantas, animales y microorganismos y sus productos de alteración son los que permiten explicar, principalmente, la presencia de materia orgánica en los suelos, cuyo contenido aumenta considerablemente en las etapas iniciales de formación del suelo. (54)

En la mayoría de los suelos, el porcentaje de materia orgánica es pequeña, pero sus efectos sobre las funciones del suelo son profundos. Este componente del suelo en constante cambio ejerce una influencia dominante sobre muchas propiedades físicas, químicas y biológicas y funciones ecosistémicas de suelos. La materia orgánica proporciona gran parte de la

capacidad de intercambio catiónico del suelo y capacidad de retención de agua. Ciertos componentes de la materia orgánica del suelo son mayormente responsables para la formación y estabilización de los agregados del suelo, especialmente nitrógeno. Además, la materia orgánica suministra la energía y crecimiento de la mayoría de los organismos. Además de mejorar el crecimiento de las plantas a través de los efectos mencionados, ciertos compuestos orgánicos hallados en los suelos tienen efectos directos estimulando el crecimiento de las plantas. Por estas razones, la cantidad y calidad de materia orgánica son centrales en determinar la calidad del suelo. (32)

La materia orgánica es una mezcla variada y compleja de sustancias orgánicas. Todas las sustancias orgánicas, por definición, contienen el elemento carbono, y, en promedio, el carbono comprende casi la mitad de la masa de la materia orgánica del suelo. La materia orgánica de los perfiles del suelo del mundo contiene, de cuatro a seis veces más carbono respecto a lo encontrado en toda la vegetación mundial. Por lo tanto, la materia orgánica del suelo juega un rol crítico en el balance global del carbono, que mayormente controla el cambio climático global. (32)

Tabla 8.
Masa de materia orgánica e inorgánica en el metro superior de los suelos del mundo (32)

Orden de suelo	Área global, 10 ³ km ²	Carbono global ^a en los 100 cm superiores			% del total del suelo global ^c
		Orgánico	Inorgánico	Total	
		Pg			
Entisols	21 137	90	263	353	14,2
Inceptisols	12 863	190	34	224	9,0
Histosols	1 526	179	0	180	7,2
Andisols	912	20	0	20	0,8
Gelisols	11 260	316 ^b	7	323	12,9
Vertisols	3 160	42	21	64	2,6
Aridisols	15 699	59	456	515	20,6
Mollisols	9 005	121	116	237	9,5
Spodosols	3 353	64	0	64	2,6
Alfisols	12 620	158	43	201	8,0
Ultisols	11 052	137	0	137	5,5
Oxisols	9 810	126	0	126	5,1
Tierras	18 398	24	0	24	1,0
Misceláneas					
Total	130 795	1 526	940	2 468	100,0

^a Valores de materia orgánica del suelo pueden ser estimados como dos veces el carbono orgánico del suelo, aunque el multiplicador tradicional usado es 1,72. El nitrógeno orgánico puede también ser estimado de los valores de carbono orgánico dividido por 12 para la mayoría de los suelos. Pg = Petagramo = 10¹⁵ g.

^b El valor para los Gelisols está probablemente subestimado.

^c Datos seleccionados de Eswaran et al. (65)

Los factores que influyen en el contenido de materia orgánica son los siguientes:

- **Vegetación:** determina la cantidad de necromasa aportada anualmente y su calidad (composición y presencia de compuestos inhibidores). Los residuos de planta aportados al suelo varían según el ecosistema de que se trate. Así, en los bosques tropicales húmedos es del orden de unos 12-15 mg materia seca ha⁻¹ año⁻¹; en bosques de zona templada unos 4 - 6 mg ha⁻¹ año⁻¹ con resinosas y de 3 mg ha⁻¹ año⁻¹ con frondosas, en praderas de zona templada unos 3 mg ha⁻¹ año⁻¹, y en zonas desérticas menos de 0,5 mg ha⁻¹ año⁻¹. (66)
(67)
- **Clima:** condiciona el tipo de especies vegetales, la producción de biomasa y el grado de actividad microbiana. En zonas áridas y semiáridas: poca vegetación, por consiguiente, poca materia orgánica. En zonas frías la materia orgánica tiende a acumularse. En zonas tropicales húmedas: muchos aportes, pero también mineralización rápida. (54)
- **Organismos del suelo:** intervienen en la alteración de la materia orgánica y en su mezcla con la materia mineral (bioturbación). Cabe destacar la acción de artrópodos, oligoquetos, bacterias, hongos y otros. (54)
- **Drenaje:** la materia orgánica se descompone mal y tiende a acumularse en suelos mal aireados en los que falta oxígeno; en aquellos que están permanentemente saturados de agua se puede formar un suelo orgánico (turbera, Histosol). (54)
- **Textura:** los suelos de textura arcillosa suelen tener más materia orgánica al retener más agua y nutrientes, lo que favorece la producción de biomasa. (54)
- **Composición mineralógica de las arcillas:** es importante por la distinta afinidad de adsorción o complejación de las moléculas orgánicas, lo que puede suponer un efecto protector frente a la acción de los microorganismos. (54)

- **Laboreo:** la puesta en cultivo con roza, tumba y quema (en agricultura itinerante) o el paso de pradera a cultivo implican una pérdida de materia orgánica, ya sea por menores aportes al suelo, por pérdida por erosión o por una mayor entrada de oxígeno al labrar. La disminución del laboreo, por lo general, incrementa el almacenamiento (secuestro) de carbono y el consiguiente contenido de materia orgánica del suelo. (54)

Los componentes orgánicos de los suelos proceden de aportes y de síntesis biótica o abiótica (54):

- Biomasa que vive en el suelo y su necromasa.
- Acumulación de restos de plantas y animales. (i) Biomasa senescente incorporada de forma natural a los suelos en cualquier ecosistema. (ii) Materiales orgánicos de origen biológico aportados por el hombre en los agroecosistemas: estiércoles, restos de cosecha, compost, etc.
- **Productos xenobióticos:** son aquellos de naturaleza orgánica, resultantes de síntesis industrial. Los más frecuentes incorporados a los suelos son los fitosanitarios y, en menor medida, plásticos y papel. También se puede incluir aquí el carbón procedente de incendios.
- Macromoléculas resultantes de los procesos de alteración y de humificación.
- Síntesis abiótica.

Fósforo (P) disponible

El P total en la superficie de los suelos varía de 0,005 a 0,15%, y disminuye con el incremento de la intensidad de la meteorización. En consecuencia, el P es mucho más bajo en suelos de regiones tropicales húmedas comparado a suelos de regiones áridas y semiáridas. Desafortunadamente la cantidad total de P total en el suelo tiene poca o ninguna relación con la disponibilidad de P para las plantas. Contrariamente, tener suelos con un contenido de P en exceso para las necesidades de las plantas, puede

incrementar el potencial de transporte de P hacia aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto, la comprensión de las relaciones e interacciones de P en los suelos y los factores que influyen la disponibilidad de P para las plantas es esencial para un manejo eficiente de P y protección de la calidad del agua. (63)

Entre los elementos nutrientes, el fósforo es solo superado por el nitrógeno en su impacto a la productividad y salud de ecosistemas terrestres y acuáticos. La cantidad total de fósforo en la mayoría de los suelos nativos es baja, con la mayor parte presente en formas no disponibles para las plantas. Los ecosistemas naturales han desarrollado formas de maximizar la eficiencia con la que las plantas usan y reciclan los suministros limitados de fósforo. Históricamente, los usos de la tierra agrícola han acelerado la pérdida y remoción de fósforo sin mejorar su reciclaje o reemplazo. La baja disponibilidad de fósforo en suelos agrícolas frecuentemente conduce a mayores problemas sociales y ambientales. Los suelos improductivos no producen la cantidad adecuada de cosecha, forzando a las personas a deforestar más tierra para producir suficientes alimentos para sobrevivir. La tierra deforestada soporta poca cubierta vegetativa y de esta manera está sujeta a la erosión que posteriormente degrada los suelos y contamina los ríos y lagos con sedimentos de la escorrentía. Este escenario pertinente hoy día en el sub - Sahara Africano, donde los suelos son deficientes en P y el inadecuado suministro de fertilizantes fosfatados ha contribuido a ser esta la principal región del mundo donde el suministro de alimentos sigue siendo inseguro. (32)

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, son importantes tres fracciones del fosfato del suelo: (i) fosfato en la solución suelo, (ii) fosfato fácilmente disponible o lábil, y (iii) fosfato no disponible. La primera fracción se define claramente y es el fosfato disuelto en la solución suelo. La segunda fracción es el fosfato sólido que se mantiene en las superficies de las partículas, de modo que está en equilibrio rápido con el fosfato de la solución. La cantidad perteneciente a esta fracción puede determinarse por medio de intercambio isotópico y se denomina fosfato fácilmente disponible o lábil. La tercera fracción

es el fosfato no disponible o insoluble. El fosfato en esta fracción puede liberarse solo muy lentamente a la fracción lábil. (68)

Se han realizado muchos intentos para relacionar el fosfato no disponible con minerales específicos de suelo. Estas investigaciones, sin embargo, se complican por el hecho que muchos fosfatos contienen impurezas que influyen en su solubilidad y, por lo tanto, en su capacidad de intercambiar iones de fosfato con la solución suelo. En muchos suelos, con $\text{pH} > 7$, particularmente en suelos calcáreos, la apatita se considera la forma más importante de fosfato inorgánico, mientras que, en suelos de pH más bajo, las formas adsorbidas y ocluidas de fosfato son las principales fracciones de P inorgánico. (68)

Los países industrializados, por muchos años, han sobrecompensado la baja disponibilidad inicial de fósforo al agregar mucho más fósforo a suelos agrícolas que el removido en las cosechas de los cultivos. La excesiva aplicación de fertilizantes conteniendo fósforo y la concentración de ganado y sus residuos orgánicos han conducido a la acumulación de fósforo en la superficie de los suelos de muchas cuencas agrícolas. El agua de escorrentía de estas cuencas agrícolas junto con la escorrentía y las aguas residuales de cuencas urbanas constituye uno de los tipos más serios de contaminación del agua. Esta contaminación es especialmente dañina para el agua de los ecosistemas de agua dulce en estuarios, lagos, y ríos en las cuales puede poner en peligro el suministro de agua para consumo y restringir el uso de recursos acuáticos para pesca, industria, y recreación. Por lo tanto, el control de este nutriente contaminante es una prioridad en programas de calidad de agua nacional y regional. (32)

Potasio (K) disponible

El potasio es el séptimo elemento más abundante ($\sim 2,5\%$) en la corteza terrestre y es generalmente absorbido por las plantas en cantidades mayores que cualquier otro nutriente excepto el nitrógeno. El contenido de K total en el suelo varía entre 0,05 y 3% y es bajo en suelos de textura gruesa formados de arenisca o cuarzo y alto en suelos de textura fina formados de materiales parentales altos en potasio. Aunque el contenido de potasio total en el suelo

excede la absorción por el cultivo durante una estación de crecimiento, solo una pequeña fracción está disponible para la planta. (63)

Los suelos altamente intemperizados están altamente lixiviados y generalmente tienen un bajo contenido de potasio. En suelos tropicales, el contenido total de K es generalmente bajo debido a la mayor meteorización por la alta lluvia y temperatura; en consecuencia, la deficiencia de K frecuentemente ocurre después de unos pocos años de cultivo en un suelo no cultivado tropical. Contrariamente, los suelos moderadamente meteorizados generalmente tienen un alto contenido de K debido a condiciones de baja lluvia. (63)

La fuente original de potasio son los minerales primarios, tales como micas (biotita y muscovita) y feldspatos potásicos (ortoclasa y microclina), Conforme estos minerales se meteorizan, sus estructuras laminares rígidas se hacen más flexibles. Por ejemplo, el potasio retenido entre las láminas de cristal de mica tipo 2:1 con el tiempo se hace más disponible, primero como formas lentamente disponibles, pero no intercambiables cerca a los bordes desgastados de los minerales y, eventualmente, como iones fácilmente intercambiables y iones disueltos en la solución suelo a partir del cual es absorbido por las raíces de las plantas. (32)

El potasio en el suelo puede dividirse en tres fracciones: el potasio como elemento estructural de los minerales del suelo, el K adsorbido de forma cambiante a los coloides del suelo (arcillas y materia orgánica), y el K presente en la solución del suelo. Por mucho, la fracción más importante en cantidad es el K incorporado a las estructuras cristalinas de los minerales. El potasio intercambiable y no intercambiable comprende solo un pequeño porcentaje del K del suelo. La fracción no intercambiable no puede ser reemplazada por amonio, pero puede liberarse durante los cultivos. Consiste principalmente en K interlaminares y puede determinarse por extracción con ácido nítrico. (68)

La conductividad eléctrica

Para diferenciar suelos salinos y sódicos de otros suelos, el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (69) propuso usar como criterio el contenido

de sales solubles y sodio intercambiable. Estos parámetros están expresados en términos de conductividad eléctrica (CE) para el contenido de sales y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) para el contenido de sodio intercambiable. (70)

La salinidad del suelo se halla midiendo la CE en milimho por centímetro (mmho/cm) del extracto saturado de suelo. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad decisiemen/m es usada, debido a que mmho/cm = decisiemen/m, la conversión es simple. El porcentaje de sodio intercambiable es entonces calculado usando la siguiente fórmula:

$$PSI = \frac{(\text{Sodio intercambiable})}{(\text{Sumatoria de cationes intercambiables})} \times 100$$

Basado en los valores de PSI y CE, se reconocen tres grupos de suelo: (i) salinos, (ii) salino sódicos, y (iii) sódicos. (70)

2.3. Definición de términos básicos

Adsorción: “el proceso por el cual los átomos, moléculas o iones se toman de la solución del suelo o de la atmósfera del suelo y se retienen en las superficies de los sólidos por unión química o física”. (71)

Contaminación de la tierra: “resultado del vertido de basura, desechos y otras toxinas que contaminan la tierra. La fuente de contaminación de la tierra proviene del elemento humano, como la basura y los desechos que son arrastrados a la orilla por los botes, las plataformas petrolíferas y las salidas de aguas residuales”. (72)

CIC: capacidad de intercambio catiónico, capacidad del suelo para retener cationes en una forma intercambiable entre la fase sólida y la fase solución. (73)

Metales pesados: según la tabla periódica, es un elemento químico con alta densidad (mayor a 4 g/cm³), masa y peso atómico por encima de 20, y son tóxicos en concentraciones bajas. (74)

Nutrientes: elementos o sustancias, tales como nitrógeno o fósforo, que son necesarios para el crecimiento de las plantas. (73)

Textura del suelo: tamaño, fineza o grosor relativo de las partículas del suelo determinada por la proporción relativa de arena, limo y arcilla. (73)

Metales tóxicos: metales presentes en escorrentías industriales, municipales y urbanas, incluyendo plomo, cobre, cadmio, zinc, mercurio, níquel y cromo en cantidades que son dañinos a humanos y biota acuática. (73)

Quelato: complejo conteniendo dos o más enlaces separados entre un ligante polidentado y un átomo simple central. (21)

Minerales secundarios: minerales formados de productos de la meteorización de minerales primarios y precipitados (minerales de arcilla, óxidos hidratados de Fe, Mn Al y carbonatos). (21)

Suelo: (1) un cuerpo natural dinámico compuesto de sólidos orgánicos y minerales, gases, líquidos y organismos vivos que puede servir como un medio para el crecimiento de las plantas, (2) la colección de cuerpos naturales ocupando partes de la superficie terrestre que son capaces de soportar el crecimiento de las plantas y que tiene propiedades resultantes de los efectos integrados de clima y organismos vivos actuando sobre el material parental, condicionados por la topografía, sobre periodos de tiempo. (71)

Alcalinidad del suelo: el grado o intensidad de alcalinidad del suelo, expresado como un valor de $\text{pH} > 7,0$ en la escala de pH.

Salinidad del suelo: la cantidad de sales solubles en un suelo, expresado en términos de porcentaje, miligramos por kilogramo, partes por millón u otras relaciones convenientes. (71)

Calidad del suelo: la capacidad de una clase específica de suelo para funcionar física, química y biológicamente, dentro de límites ecosistémicos naturales y

manejados, para maximizar el aprovisionamiento y regulación de los servicios ecosistémicos. (71)

Solución suelo: la fase líquida acuosa del suelo y sus solutos, consistente de iones disociados de superficies de las partículas del suelo y otros materiales solubles. (71)

Limo: (1) una separata del suelo consistente de partículas entre 0,05 y 0,002 mm en diámetro equivalente, (2) una clase textural del suelo. (71)

Separata del suelo: uno de los grupos de tamaño individual de partículas minerales del suelo, arena, limo o arcilla. (71)

Arena: (1) una partícula del suelo entre 0,05 y 2,0 mm en diámetro, (2) una clase textural de suelo. (71)

Arcilla: (1) una separata del suelo consistente de partículas menores de 0,002 mm en diámetro equivalente, (2) una clase textural del suelo conteniendo > 40% de arcilla, < 45% de arena y < 40% de limo. (71)

Macroporos: poros grandes del suelo, generalmente que tienen un diámetro mayor de 0,08 mm, de los cuales el agua drena fácilmente por gravedad. (71)

Densidad de volumen del suelo: la masa de suelo seco por unidad de volumen de suelo, incluyendo el espacio aéreo. La densidad de volumen es determinada con un suelo secado hasta peso constante a 105 °C. (71)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

A) Método general de la investigación

El método general de investigación fue hipotético- deductivo. Este método consiste en un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis y busca refutar o falsear tales hipótesis, deduciendo de ellas conclusiones que deben confrontarse con los hechos. (75)

En resumen, consiste en la generación de hipótesis a partir de dos premisas, una universal (leyes y teorías científicas, denominada: enunciado nomológico) y otra empírica (denominada enunciado entimemático, que sería el hecho observable que genera el problema y motiva la indagación), para llevarla a la contrastación empírica. (76) Tiene la finalidad de comprender los fenómenos y explicar el origen o las causas que la generan. Sus otros objetivos son la predicción y el control, que serían una de las aplicaciones más importantes con sustento, asimismo, en las leyes y teorías científicas. (77)

B) Método específico de la investigación

En este trabajo de investigación se utilizó el método de análisis. Se realizó el análisis de caracterización del suelo del distrito de Leonor Ordóñez, así como el análisis de cadmio total; este metal pesado se analizó mediante digestión de

la muestra de suelo y medición con Espectroscopía de Absorción Atómica de llama. El método de espectroscopía de llama tiene como requisito que la muestra sea introducida en disolución. En esta investigación se utilizó una digestión húmeda por medio de ácido nítrico, obteniendo extractos acuosos de cada muestra, y analizada por flama siguiendo el método de la USEPA 3051 A. (78)

Por este método se realizó la medición de la concentración de cadmio que presenta absorción de la radiación a una longitud de onda particular. La especie atómica se logra por atomización de la muestra, pudiendo utilizar distintos procedimientos, técnicas y accesorios, para llegar al estado fundamental de átomo. Una de las técnicas más utilizadas para realizar la atomización es la absorción atómica con flama o llama, que se describe a continuación.

En un atomizador de flama se nebulizó una solución de la muestra, mediante el flujo de un gas oxidante mezclado con un combustible también gaseoso, y se llevó hacia una flama donde ocurre la atomización. Durante la desolvatación, el disolvente se evapora y produce un aerosol molecular finamente dividido; después, este se volatiliza para formar moléculas de gas. La disociación de la mayor parte de estas moléculas produce un gas atómico. Algunos de los átomos de este gas se ionizan y forman cationes y electrones. Una fracción de las moléculas, átomos e iones se excitan por el calor de la flama y producen espectros de emisión: atómicos, iónicos y moleculares. (79)

Los átomos neutros gaseosos, en su estado fundamental, absorben radiación a longitudes de onda específicas. La medición de la magnitud de esa absorción atómica y su aplicación y análisis cuantitativo constituyen la espectrometría de absorción atómica. La fuente primaria de radiación luminosa es generalmente una lámpara de cátodo hueco del elemento cadmio. (78)

Tabla 9.***Métodos de análisis de suelos utilizados en la presente investigación***

Determinación	Unidad	Método
Textura	-	Triángulo textural
Arena	%	Bouyoucos
Limo	%	Bouyoucos
Arcilla	%	Bouyoucos
Densidad aparente	Mg.m ⁻³	Probeta
Capacidad de campo	%	Gravimétrico
Porosidad total	%	Probeta
pH	-	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	dS.cm ⁻¹	Conductómetro
Capacidad de Intercambio Catiónico	cmol(+).kg ⁻¹	CaCl ₂ . 1N
Fósforo disponible	mg.kg ⁻¹	Olsen modificado
Potasio Disponible	mg.kg ⁻¹	Cobaltinitrito

3.1.2. Alcances de la investigación**A) Tipo de investigación**

La investigación es aplicada, pues se aplican los principios de la ciencia del suelo en la determinación del contenido de cadmio y sus relaciones con las propiedades fisicoquímicas en la capa superficial de suelo.

La investigación aplicada consiste en realizar trabajos aplicados con la finalidad de adquirir nuevos conocimientos, sin embargo, está dirigido fundamentalmente a un objetivo práctico específico. Este tipo de investigación implica la consideración de todos los conocimientos existentes y su profundización, en un intento de solucionar problemas específicos. Los resultados de la investigación aplicada se refieren a un único producto o a un número limitado de productos, operaciones, métodos o sistemas. (80)

La investigación aplicada es de naturaleza eminentemente práctica realizada con la intención de aplicar los conocimientos científicos a la solución o tratamiento de problemas científicos. La investigación aplicada tiene la siguiente estructura general:

- Se parte de una situación problemática, que requiere ser intervenida y mejorada. Se describe sistemáticamente esa situación, aplicando los criterios para tal fin.

- Se selecciona una teoría de carácter reconocido, aplicable al problema. Se expone sistemáticamente esa teoría, tanto en sus conceptos centrales como en sus rasgos textuales.
- Se examina la situación problemática descrita, a la luz de la teoría seleccionada, de este examen se deriva un sistema de acciones y de previsiones que, de ponerse en práctica, resolvería favorablemente la situación problemática o el problema estudiado. (81)

B) Nivel de investigación

El nivel del presente trabajo de investigación es descriptiva-correlacional, para determinar el contenido de cadmio en el suelo agrícola del distrito de Leonor Ordóñez, calificar el nivel de contaminación, analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo y relacionar las propiedades del suelo con el contenido de cadmio.

Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Los estudios correlacionales tienen como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto particular. En ocasiones solo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio relaciones entre tres o más variables. Los estudios correlacionales, al evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, miden cada una de ellas (presuntamente relacionadas) y, después, cuantifican y analizan la vinculación. Tales correlaciones se sustentan en hipótesis sometidas a prueba. (82)

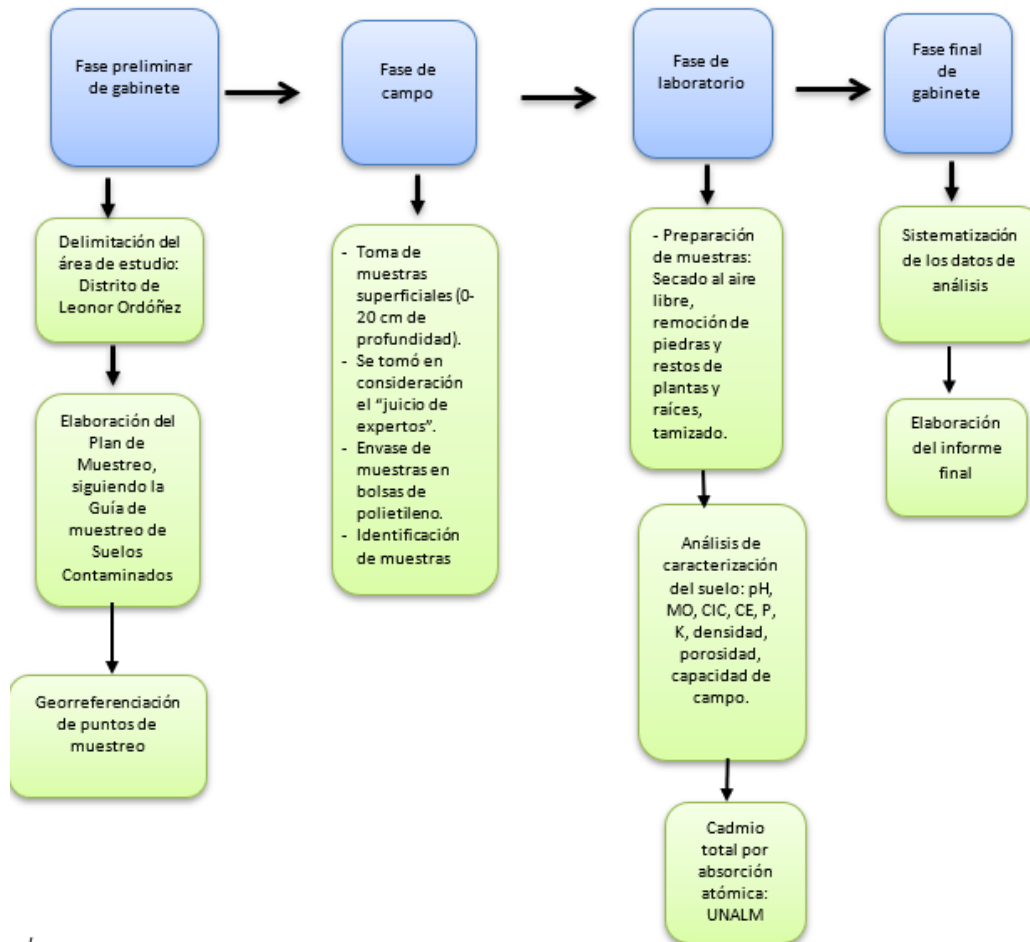


Figura 1. Diseño teórico de la investigación

3.2. Diseño de la investigación

Se utilizará un diseño no experimental transeccional descriptivo. Es no experimental porque no se manipularon variables, lo que se ha hecho es observar cómo se da en suelos agrícolas la presencia de cadmio, para posteriormente analizarlos. Es *transeccional* porque se recolectaron datos en un solo momento, el propósito fue describir variables y analizar su incidencia o interrelación en un momento dado; es como tomar una fotografía de algo que sucede. Es *descriptivo* porque tiene como objetivo indagar la incidencia de los niveles de una variable en una población. (82)

La determinación del contenido de cadmio en las muestras de suelo del distrito de Leonor Ordóñez corresponde al siguiente modelo:

$$\gamma_i = X_i + \varepsilon_i$$

ξ = Suelo agrícola

γ_i = Contenido de cadmio, propiedades del suelo.

ε_i = error de observación

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Suelos del distrito de Leonor Ordóñez, de la parte baja del distrito, entre la carretera de la margen derecha Huancayo – Jauja y la orilla del río Mantaro; provincia de Jauja, región Junín, cuya área total aproximada de 60 000 m².

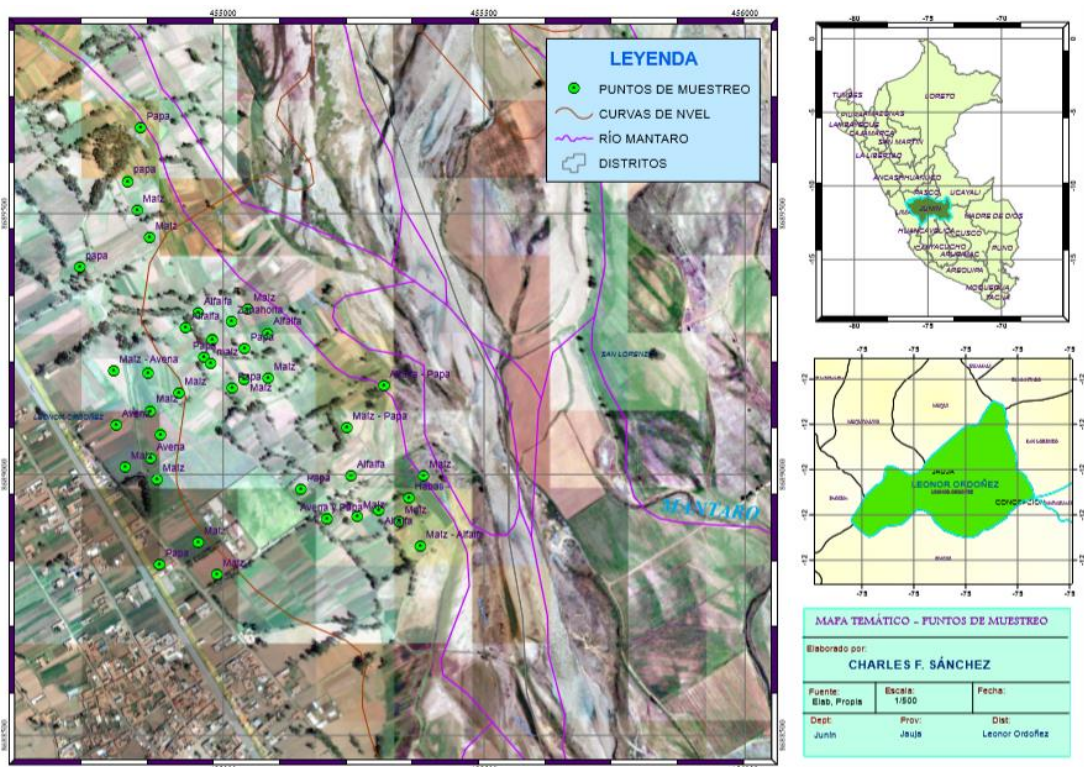


Figura 2. Mapa de muestreo en el distrito Leonor Ordóñez, Jauja

3.3.2. Muestra

Suelos agrícolas del distrito de Leonor Ordóñez en un área aproximada de 10 ha, en una profundidad promedio de 20 cm, que abarca la capa superficial arable.

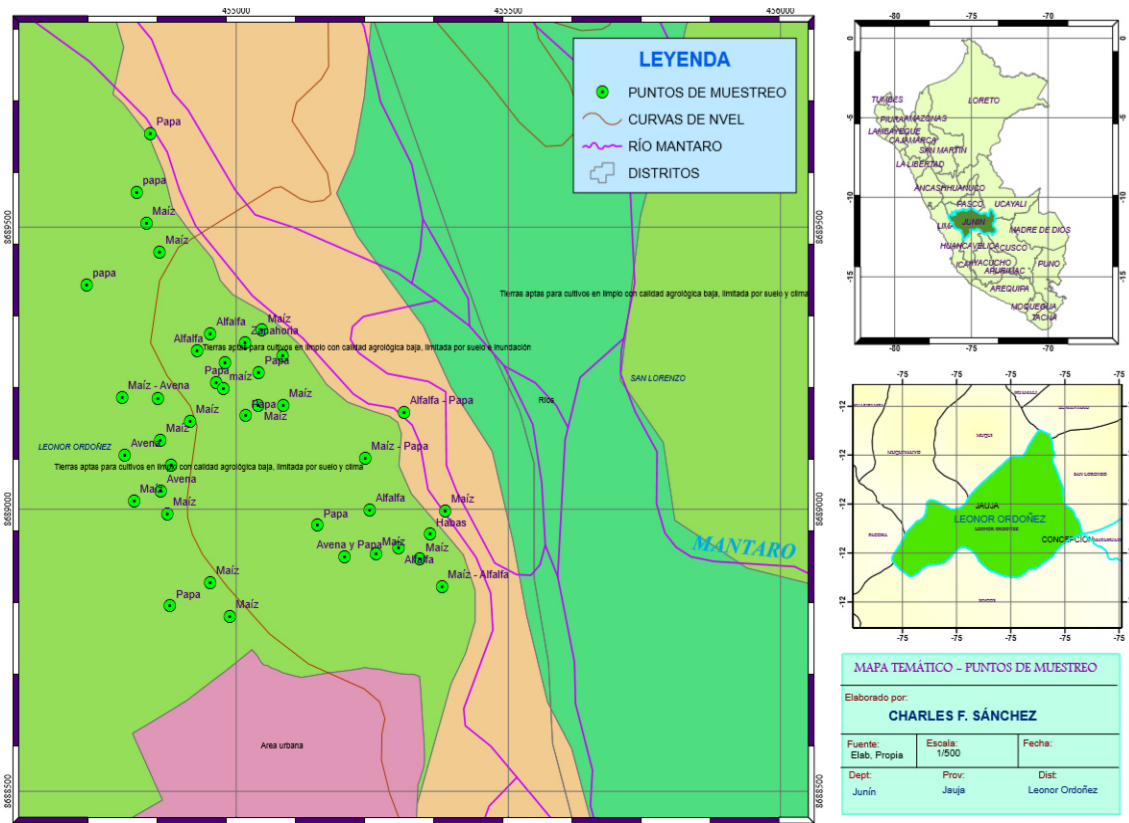


Figura 3. Puntos de muestreo y clasificación de tierras por capacidad de uso mayor

3.4. Técnicas de recolección de datos

La muestra estuvo constituida por puntos de muestreo ubicados en un transecto (10 ha) siguiendo las pautas de un muestreo de identificación del Reglamento de Muestreo de Suelos Contaminados del Ministerio del Ambiente, para obtener 40 muestras.

El muestreo de identificación tuvo por objetivo investigar la existencia de contaminación del suelo a través de la obtención de muestras representativas con el fin de establecer si el suelo supera o no los estándares de Calidad Ambiental o los valores de fondo de acuerdo a la establecido en el D.S 011-2017-MINAM.

En este muestreo de identificación, no se dispone de datos precisos sobre la concentración de compuestos contaminantes en un suelo, sin embargo, para contar con un límite de confianza aceptable, es pertinente realizar un número mínimo de puntos de muestreo. (52)

Para la toma de las muestras superficiales (hasta una profundidad promedio de 30 cm) se utilizó una lampa tipo “recta”, para obtener aproximadamente 1 kg por cada muestra individual.

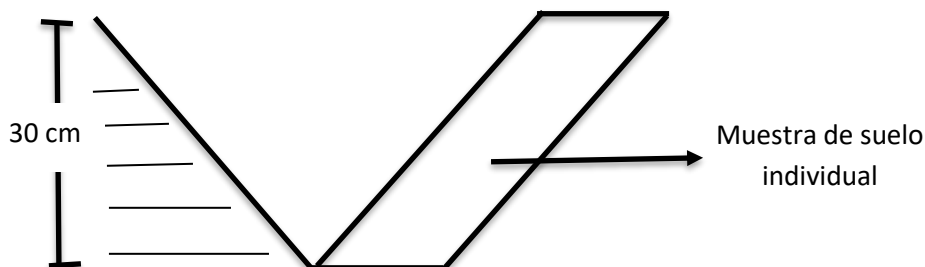


Figura 4. Obtención de muestra de suelo individual (83)

El número mínimo de puntos de muestreo se determinó en función del área agrícola de potencial interés dentro del distrito de Leonor Ordoñez, constituido por área de cultivos de maíz, papa, trigo, cebada y pastos.

3.5. Técnicas de análisis de datos

Los datos fueron ordenados y se calcularon los estadísticos descriptivos de promedio, mediana, valor máximo, valor mínimo, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis.

Los resultados analíticos fueron comparados con el ECA de suelos del Perú. Si los valores detectados en el suelo superan los valores del ECA, se determina que el suelo está contaminado. (64)

Finalmente, se relacionó el contenido de cadmio con las propiedades fisicoquímicas de los suelos, para determinar correlación y regresión significativa.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el Software Stagraphics Centurion XVI.I. (84)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1. Propiedades físicas de los suelos

4.1.1.1. Contenido de arcilla

Tabla 10.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de arcilla (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
n	40
Promedio (%)	32,99
Mediana (%)	33,00
Desviación estándar (%)	10,11
Coefficiente de variación (%)	30,64
Mínimo (%)	8,00
Máximo (%)	53,00
Rango (%)	45,00

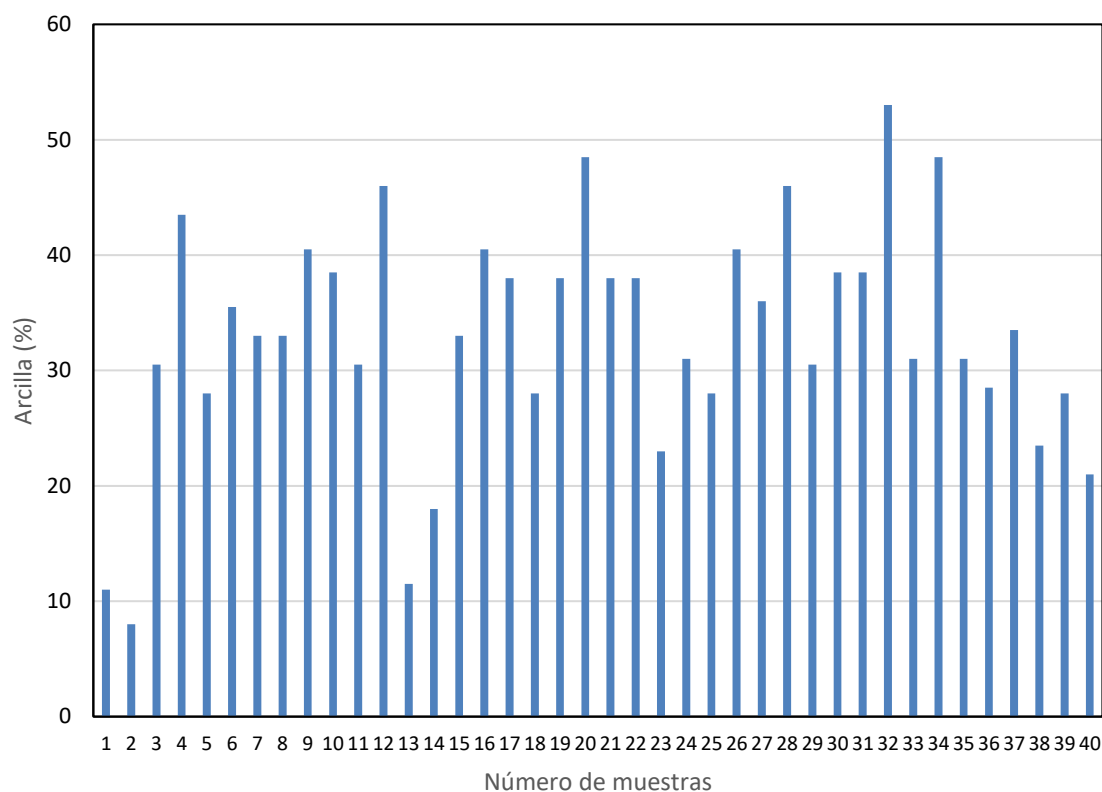


Figura 5. Contenido de arcilla en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.1.2. Contenido de arena

Tabla 11.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de arena (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio (%)	35,20
Mediana (%)	33,50
Desviación estándar (%)	13,07
Coefficiente de variación (%)	37,12
Mínimo (%)	12,00
Máximo (%)	76,50
Rango (%)	64,50

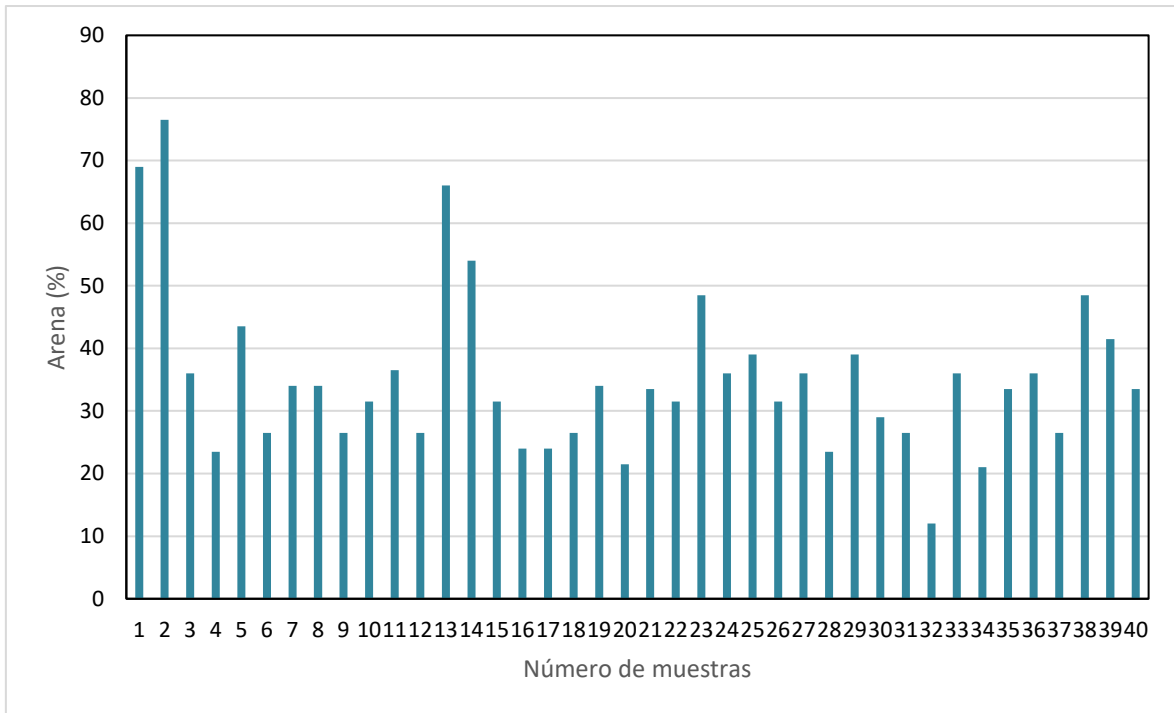


Figura 6. Contenido de arena en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.1.3. Contenido de limo

Tabla 12.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de limo (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
n	40
Promedio (%)	31,81
Mediana (%)	32,75
Desviación estándar (%)	5,64
Coefficiente de variación (%)	17,72
Mínimo (%)	15,50
Máximo (%)	45,50
Rango (%)	30,00

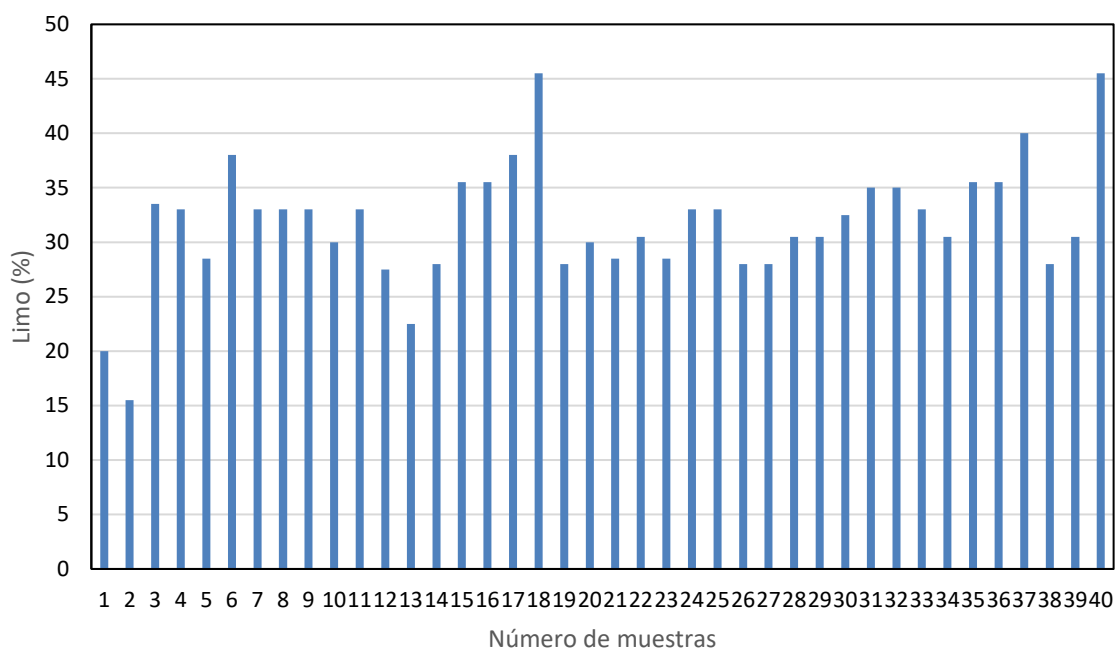


Figura 7. Contenido de limo en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.1.4. Densidad aparente

Tabla 13.

Medidas de tendencia central y de variación de la densidad aparente (mg.m^{-3}) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
n	40
Promedio (mg.m^{-3})	1,17
Mediana (mg.m^{-3})	1,16
Desviación estándar (mg.m^{-3})	0,09
Coefficiente de variación (%)	8,05
Mínimo (mg.m^{-3})	1,03
Máximo (mg.m^{-3})	1,59
Rango (mg.m^{-3})	0,56

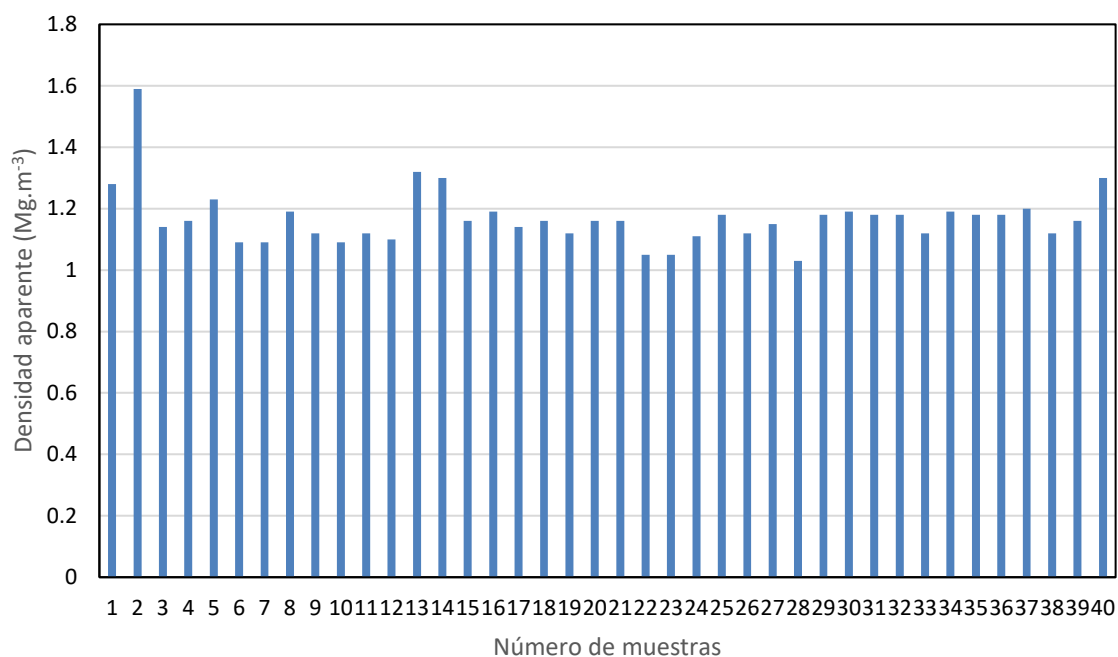


Figura 8. Densidad aparente en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.1.5. Capacidad de campo

Tabla 14. Medidas de tendencia central y de variación de la capacidad de campo (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
n	40
Promedio (%)	24,16
Mediana (%)	24,09
Desviación estándar (%)	2,80
Coeficiente de variación (%)	11,61
Mínimo (%)	19,29
Máximo (%)	30,98
Rango (%)	11,69

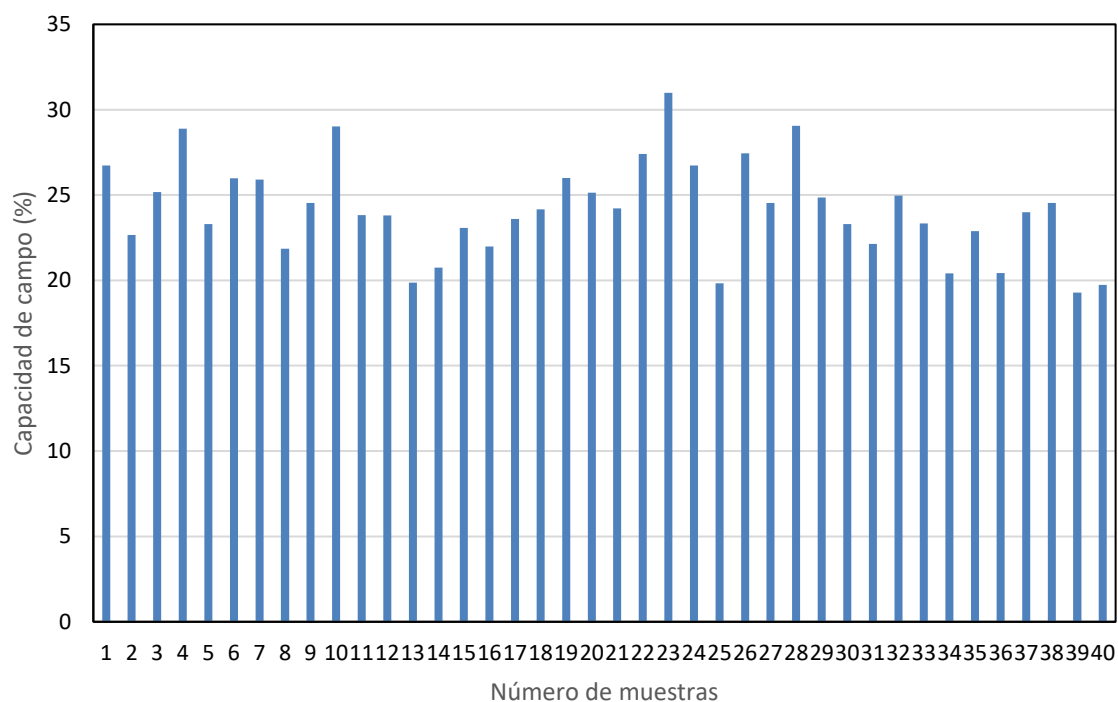


Figura 9. Capacidad de campo en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.1.6. Porosidad total

Tabla 15.

Medidas de tendencia central y de variación de la porosidad total (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio (%)	46,31
Mediana (%)	46,38
Desviación estándar (%)	2,17
Coefficiente de variación (%)	4,68
Mínimo (%)	39,68
Máximo (%)	52,94
Rango (%)	13,26

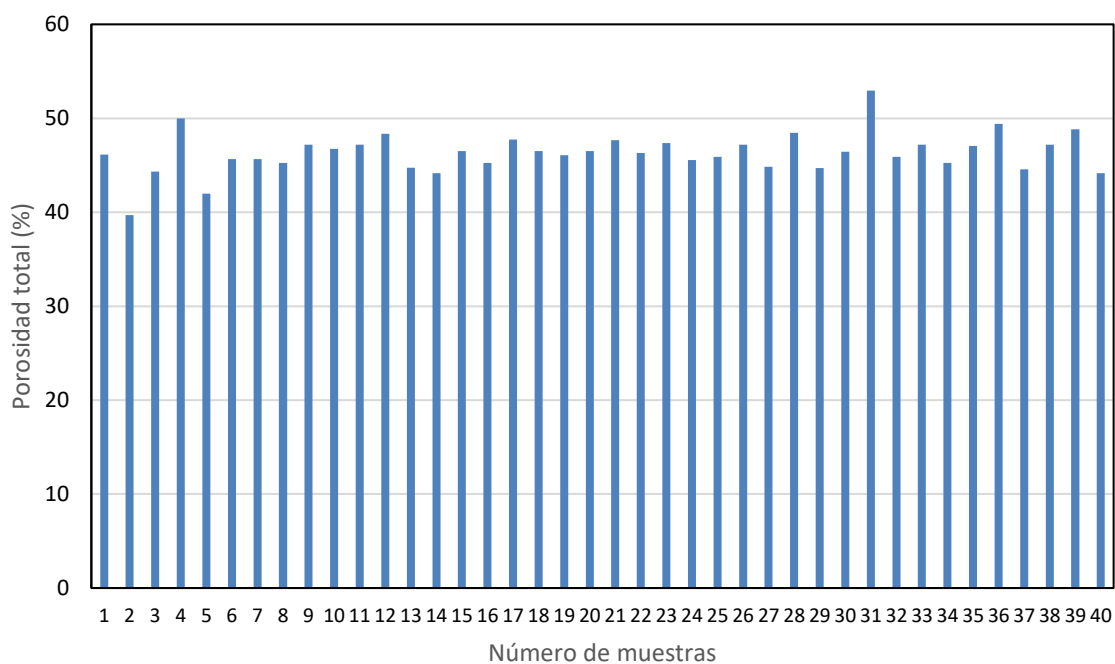


Figura 10. Porosidad total en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.2. Propiedades químicas de los suelos

4.1.2.1. pH

Tabla 16.

Medidas de tendencia central y de variación del pH en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio	8,01
Mediana	8,02
Desviación estándar	0,15
Coficiente de variación (%)	1,86
Mínimo	7,62
Máximo	8,31
Rango	0,69

Tabla 17.

Distribución de frecuencias del pH en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Clase	Límite inferior de la clase	Límite superior de la clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1 (Fuertemente ácido)	[0,00	5,5]	0	0	0	0
2 (Moderadamente ácido)	(5,5	6,0]	0	0	0	0
3 (Ligeramente ácido)	(6,0	6,5]	0	0	0	0
4 (Neutro)	(6,5	7,0]	0	0	0	0
5 (Ligeramente alcalino)	(7,0	7,8]	3	0,075	3	0,075
6 (Moderadamente alcalino)	(7,8	8,4]	37	0,925	40	1,000
7 (Fuertemente alcalino)	(8,4	>)	0	0	40	1,000

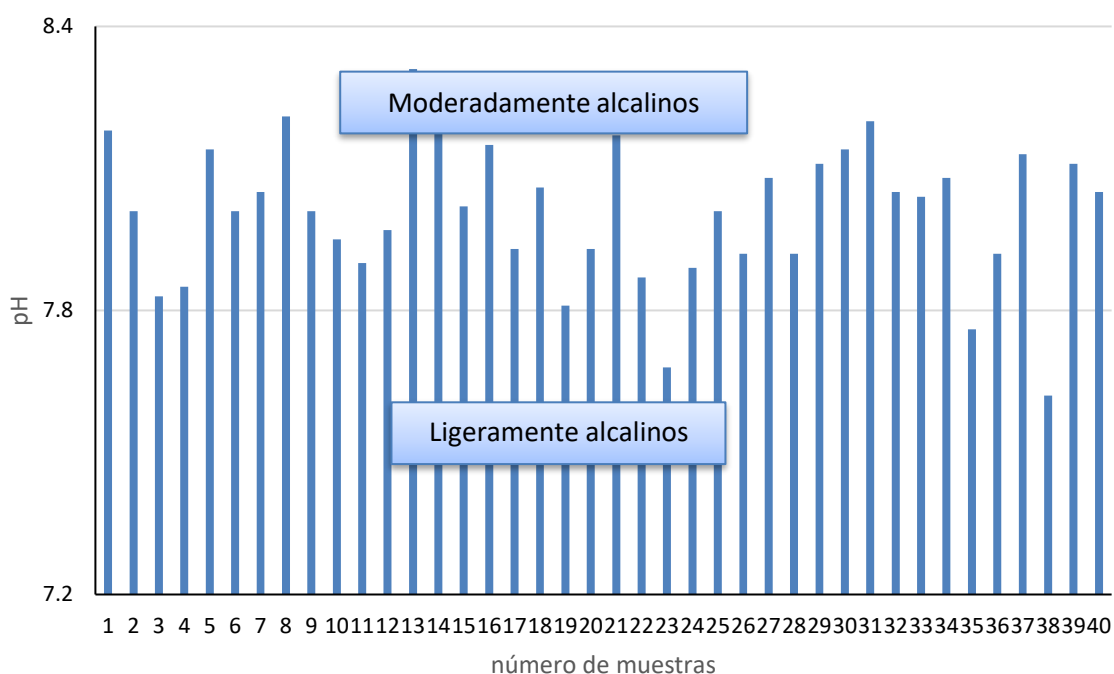


Figura 11. pH en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordóñez. Jauja

4.1.2.2. Conductividad eléctrica

Tabla 18.

Medidas de tendencia central y de variación de la conductividad eléctrica (dS.m⁻¹) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio (dS.m ⁻¹)	0,55
Mediana (dS.m ⁻¹)	0,47
Desviación estándar (dS.m ⁻¹)	0,40
Coeficiente de variación (%)	72,88
Mínimo (dS.m ⁻¹)	0,24
Máximo (dS.m ⁻¹)	2,67
Rango (dS.m ⁻¹)	2,43

Tabla 19.

Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica (dS.m⁻¹) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Clase	Límite inferior de la clase	Límite superior de la clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1 (No salino)	[0,00	2,00]	39	0,98	39	0,98
2 (Muy ligeramente salino)	(2,00	4,00]	1	0,02	40	1,00
3 (Ligeramente salino)	(4,00	8,00]	0	0,00	40	1,00
4 (Moderadamente salino)	(8,00	16,00]	0	0,00	40	1,00
5 (Fuertemente salino)	(16,00	>)	0	0,00	40	1,00

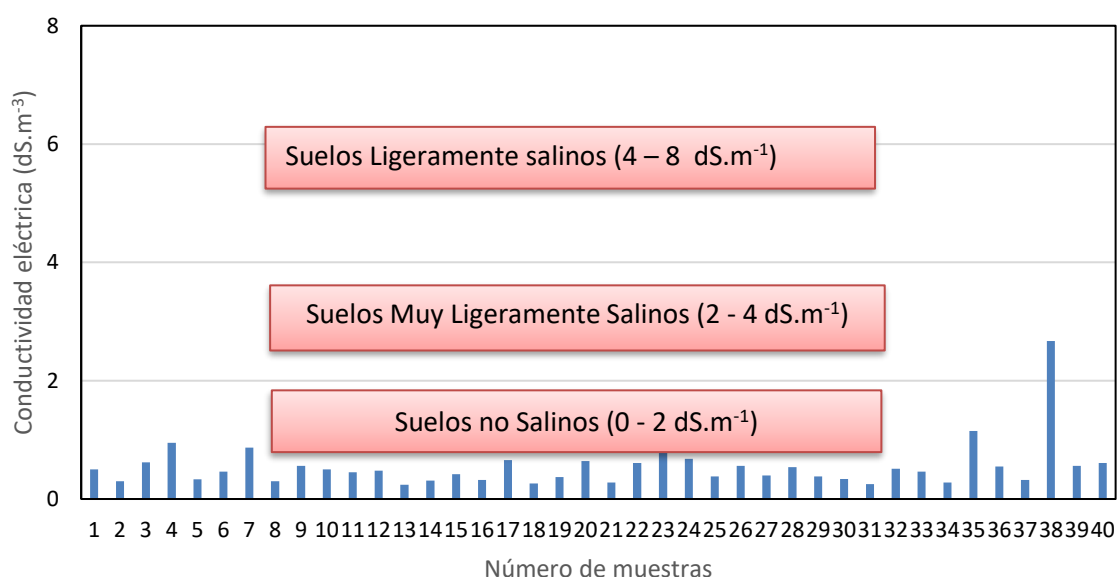


Figura 12. Conductividad eléctrica en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordóñez. Jauja

4.1.2.3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Tabla 20.

Medidas de tendencia central y de variación de la capacidad de intercambio catiónico ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$)	13,73
Mediana ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$)	13,68
Desviación estándar ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0,62
Coefficiente de variación (%)	4,51
Mínimo ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$)	12,56
Máximo ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$)	15,12
Rango ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2,56

Tabla 21.

Distribución de frecuencias de la capacidad de intercambio catiónico ($\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Clase	Límite inferior de la clase	Límite superior de la clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1 (Muy Baja)	[0,00	4,00]	0	0,00	0	0,00
2 (Moderadamente baja)	(4,00	8,00]	0	0,00	0	0,00
3 (Baja)	(8,00	12,00]	0	0,00	0	0,00
4 (Moderadamente alta)	(12,00	20,00]	40	1,00	40	1,00
5 (Alta)	(20,00	>)	0	0,00	40	1,00

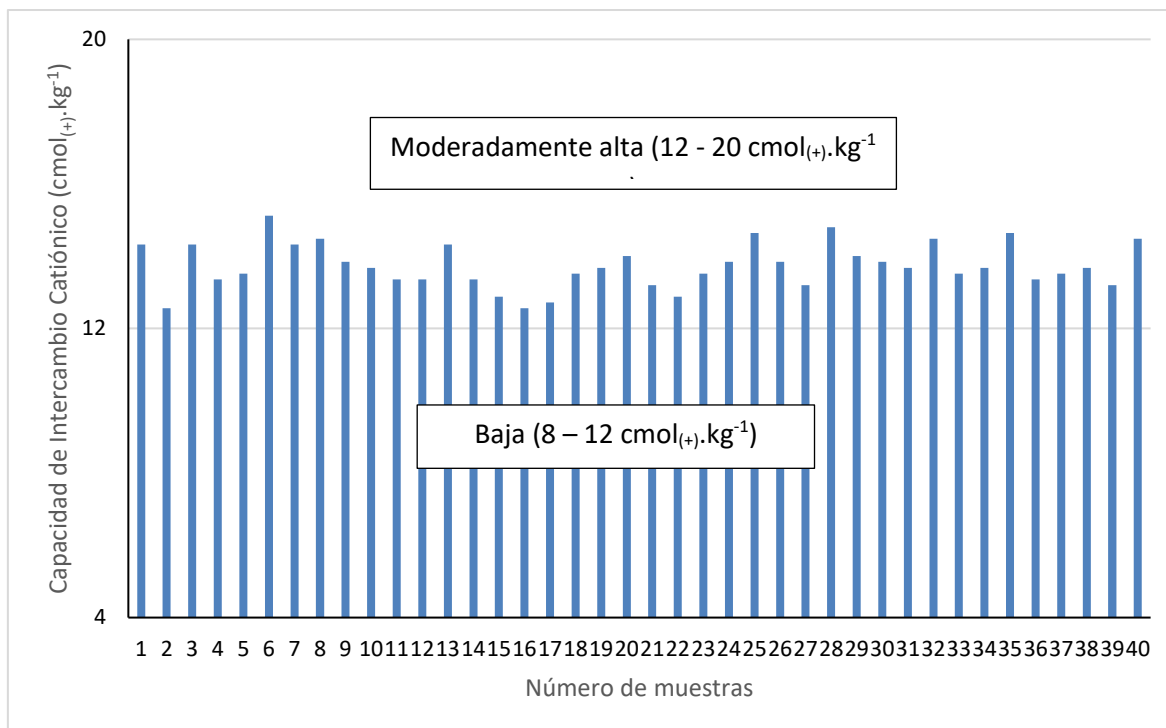


Figura 13. Capacidad de Intercambio Catiónico (cmol₍₊₎·kg⁻¹) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.2.4. Contenido de materia orgánica (MO)

Tabla 22.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de materia orgánica (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
n	40
Promedio (%)	2,19
Mediana (%)	2,07
Desviación estándar (%)	0,74
Coefficiente de variación (%)	33,69
Mínimo (%)	0,77
Máximo (%)	3,46
Rango (%)	2,69

Tabla 23.

Distribución de frecuencias del contenido de materia orgánica del contenido de materia orgánica (%) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Clase	Límite inferior de la clase	Límite superior de la clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1 (Bajo)	[0,00	2,00]	17	0,425	17	0,425
2 (Medio)	(2,00	4,00]	23	0,575	40	1,000
3 (Alto)	(4,00	>]	00	0,000	0	1,000

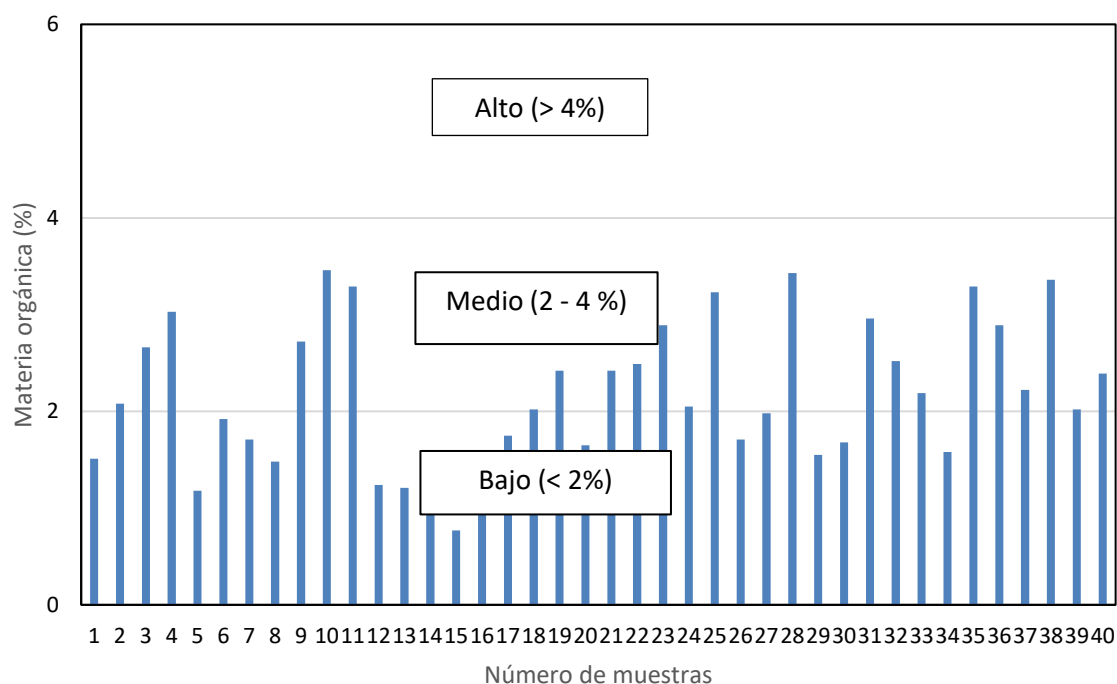


Figura 14. Contenido de materia orgánica (%) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.2.5. Contenido fósforo disponible (mg.kg^{-1})

Tabla 24.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de fósforo disponible (mg.kg^{-1}) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio (mg.kg^{-1})	26,92
Mediana (mg.kg^{-1})	26,47
Desviación estándar (mg.kg^{-1})	11,29
Coefficiente de variación (%)	41,94
Mínimo (mg.kg^{-1})	9,08
Máximo (mg.kg^{-1})	49,67
Rango (mg.kg^{-1})	40,59

Tabla 25.

Distribución de frecuencias del contenido de fósforo disponible (mg.kg^{-1}) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Clase	Límite inferior de la clase	Límite superior de la clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1 (Bajo)	[0,00	7,00]	0	0,00	0	0,00
2 (Medio)	(7,00	14,00]	6	0,15	6	0,15
3 (Alto)	(14,00	>]	34	0,85	40	1,00

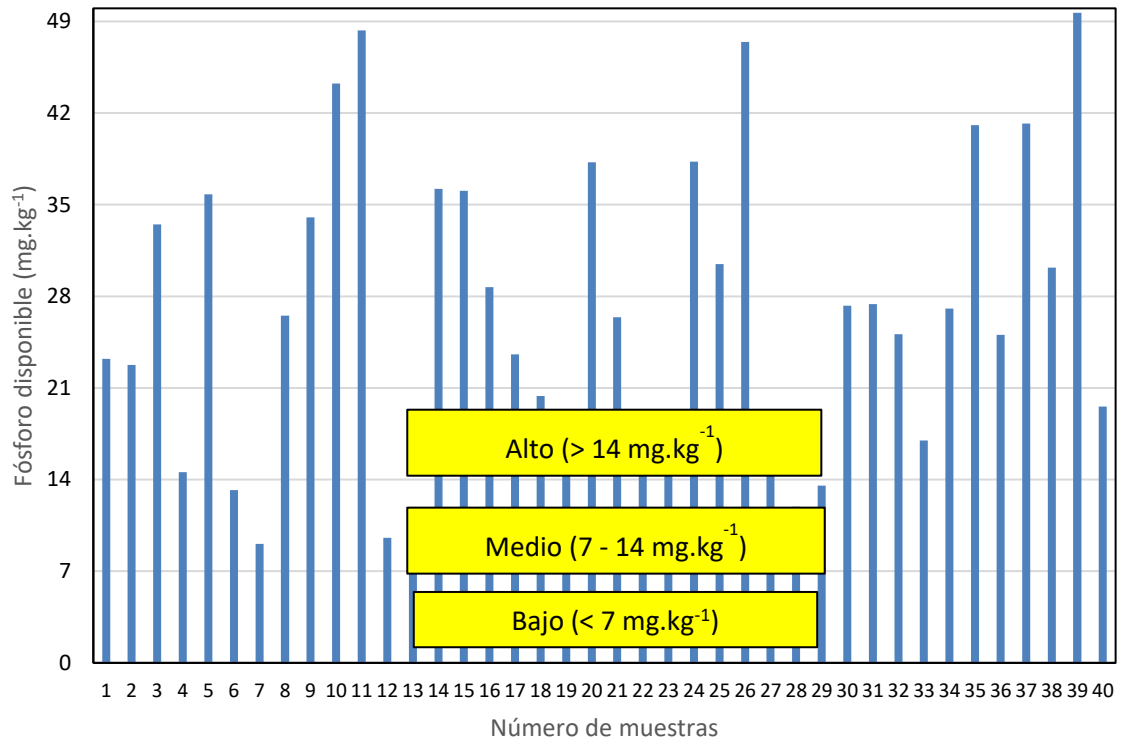


Figura 15. Contenido de fósforo disponible (mg.kg^{-1}) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.2.6. Contenido potasio disponible (mg.kg^{-1})

Tabla 26.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de potasio disponible (mg.kg^{-1}) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio (mg.kg^{-1})	219,45
Mediana (mg.kg^{-1})	221,00
Desviación estándar (mg.kg^{-1})	12,22
Coeficiente de variación (%)	5,57
Mínimo (mg.kg^{-1})	194,00
Máximo (mg.kg^{-1})	242,00
Rango (mg.kg^{-1})	48,00

Tabla 27.

Distribución de frecuencias del contenido de potasio disponible (mg.kg^{-1}) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Clase	Límite inferior de la clase	Límite superior de la clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1 (Bajo)	[0,00	100]	0	0,00	0	0,00
2 (Medio)	(100	240]	39	0,975	39	0,975
3 (Alto)	(240	>]	1	0,025	40	1,000

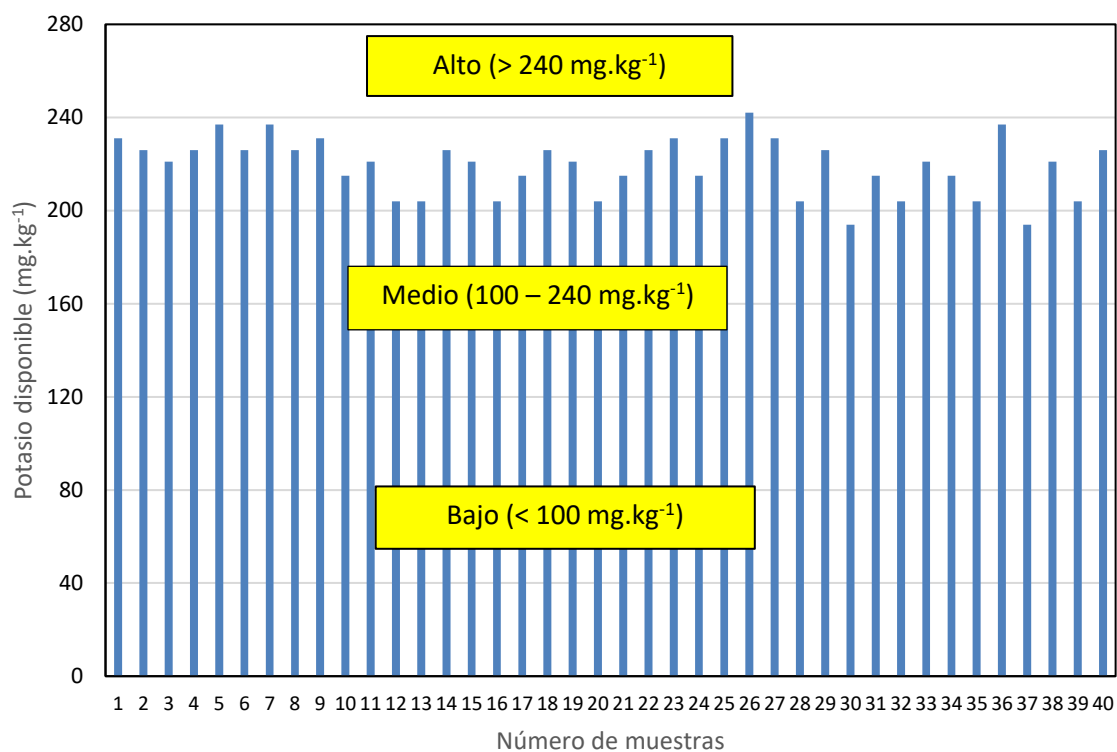


Figura 16. Contenido de potasio disponible (mg.kg⁻¹) en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

4.1.3. Contenido de cadmio en el suelo

Tabla 28.

Medidas de tendencia central y de variación del contenido de cadmio (mg.kg⁻¹) en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, departamento de Junín

Estadísticos	Valores
N	40
Promedio (mg.kg⁻¹)	7,93
Mediana (mg.kg⁻¹)	5,61
Desviación estándar (mg.kg⁻¹)	6,58
Coefficiente de variación (%)	82,98
Mínimo (mg.kg⁻¹)	1,88
Máximo (mg.kg⁻¹)	29,91
Rango (mg.kg⁻¹)	28,03

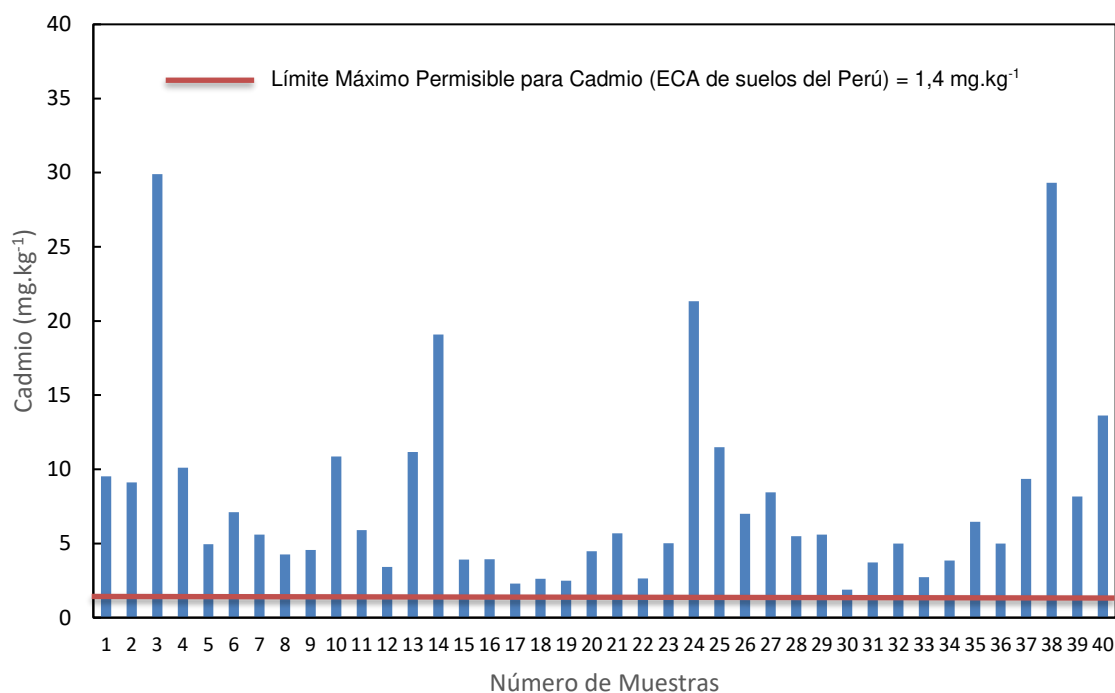


Figura 17. Contenido de cadmio en muestras de suelo de la capa superficial (0-20 cm), distrito Leonor Ordoñez. Jauja

Prueba de Hipótesis

Los niveles de cadmio en la capa superficial de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez superan el Límite Máximo Permissible (LMP) del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de suelos del Perú.

Formulación de la hipótesis a contrastar

Ho: el contenido de cadmio en los suelos del distrito de Leonor Ordoñez es igual o menor al Límite Máximo Permissible (LMP) del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de suelos del Perú.

$$Ho: \mu_1 = 1,4 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ (suelos no contaminados)}$$

Ha: el contenido de cadmio en los suelos del distrito de Leonor Ordoñez es mayor al Límite Máximo Permissible (LMP) del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de suelos del Perú.

$$Ho: \mu_1 > 1,4 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ (suelos contaminados)}$$

Para la prueba de hipótesis se utiliza la prueba de T de Student acerca de la media poblacional (μ), en una prueba de cola a la derecha, debido a que se va a comparar el contenido promedio de cadmio en las muestras de suelo (mg/kg) con respecto al Límite Máximo Permisible del ECA de suelos del Perú es 1,4 mg/kg.

A. Nivel de significación

$$\alpha = 0,05$$

B. Estadística

Población normal, con varianza desconocida y $n = 40$.

Si $H_0: \mu = 1,4$ es verdadera, a la estadística es

$$t = \frac{\bar{x} - 1,4}{s/\sqrt{n}}$$

Que se distribuye según una t-Student con 39 grados de libertad.

C. Región crítica

Con el nivel de significación $\alpha = 0,05$ y para una prueba de hipótesis unilateral cola a la derecha, en la tabla de probabilidades de t-Student se encuentra $t_{2(0,05)(GL=39)} = t_{(0,1)(gl=39)} = 1,685$.

Consecuentemente, la región crítica es: $RC = \{t < 1,685\}$.

D. Cálculos

De los datos de la muestra se obtiene:

$$n = 40, \bar{x} = 7,93 \text{ mg/kg}, s = 6,58, \text{ error estándar: } s/\sqrt{n} = 1,04$$

$$t = \frac{\bar{x} - 1,4}{s/\sqrt{n}} = \frac{7,93 - 1,4}{1,04} = 6,28$$

E. Decisión

Dado que t_c no pertenece a la región crítica (RC), debemos rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Se puede afirmar que los suelos del distrito de Leonor Ordóñez superan el Estándar de Calidad Ambiental de cadmio, y están contaminados con este metal pesado, con un 5% de probabilidad de error.

4.1.4. Regresión y correlación

4.1.4.1. Correlación

Prueba de Hipótesis:

$H_0: \rho = 0$ No hay correlación

$H_a: \rho \neq 0$ Si hay correlación

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Tabla 29.
Resultados del análisis de correlación

Variables	r calculado	r Tablas		significación
		0,05	0,01	
Propiedades físicas				
y = cadmio (mg.kg ⁻¹) x = arena (%)				
Decisión: se rechaza H_0 y se acepta H_a : existe correlación.	0,4293	0,3166	0,4080	**
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = arcilla (%)				
Decisión: se rechaza H_0 y se acepta H_a : existe correlación	-0,4461	0,3166	0,4080	**
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = limo (%)				
Decisión: se acepta H_0 . No existe correlación	-0,1104	0,3166	0,4080	ns
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = densidad aparente (Mg.m ⁻³)				
Decisión: se acepta H_0 . No existe correlación	0,1245	0,3166	0,4080	ns
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = porosidad total (%)				
Decisión: se acepta H_0 . No existe correlación	-0,2254	0,3166	0,4080	ns
X = cadmio (mg.kg ⁻¹)				
	-0,0038	0,3166	0,4080	ns

Y = capacidad de campo (%) Decisión: se acepta Ho. No existe correlación				
Propiedades químicas				
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = pH Decisión: se rechaza Ho y se acepta Ha: existe correlación	0,3740	0,3166	0,4080	*
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = CIC (cmol(+).kg ⁻¹) Decisión: se acepta Ho. No existe correlación	0,1861	0,3166	0,4080	ns
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = CE (dS.m ⁻¹) Decisión: se rechaza Ho y se acepta Ha: existe correlación	0,6068	0,3166	0,4080	**
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = materia orgánica (%) Decisión: se acepta Ho. No existe correlación	0,2067	0,3166	0,4080	ns
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = fósforo (mg.kg ⁻¹) Decisión: se acepta Ho. No existe correlación	0,2203	0,3166	0,4080	ns
X = cadmio (mg.kg ⁻¹) Y = potasio (mg.kg ⁻¹) Decisión: se acepta Ho. No existe correlación	0,077	0,3166	0,4080	ns

4.1.4.2. Regresión

Contenido de arena (X) y el contenido de cadmio (Y)

Prueba de Hipótesis:

Ho: $\beta = 0$ No hay regresión

Ha: $\beta \neq 0$ Si hay regresión

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Tabla 30.

Análisis de variancia de la regresión entre el contenido de arena (X) y el contenido de cadmio (Y) en la capa superficial de los suelos (0 – 20 cm) del distrito de Leonor Ordóñez

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculada	p-valor
Regresión	3,225	1	3,225	8,59	0,0057
Error	14,273	38	0,376		
Total	17,498	39			

Ecuación de regresión (Log Y raíz cuadrada de X) $Cd = \exp(a + b * \sqrt{\text{arena}})$

Decisión:

Se rechaza Ho y se acepta Ha. Si hay regresión

$$Cd = \exp(0.203562 + 0.278138 * \sqrt{\text{Arena}}) \quad r = 0,4293^{**} \quad r^2 = 0,1843$$

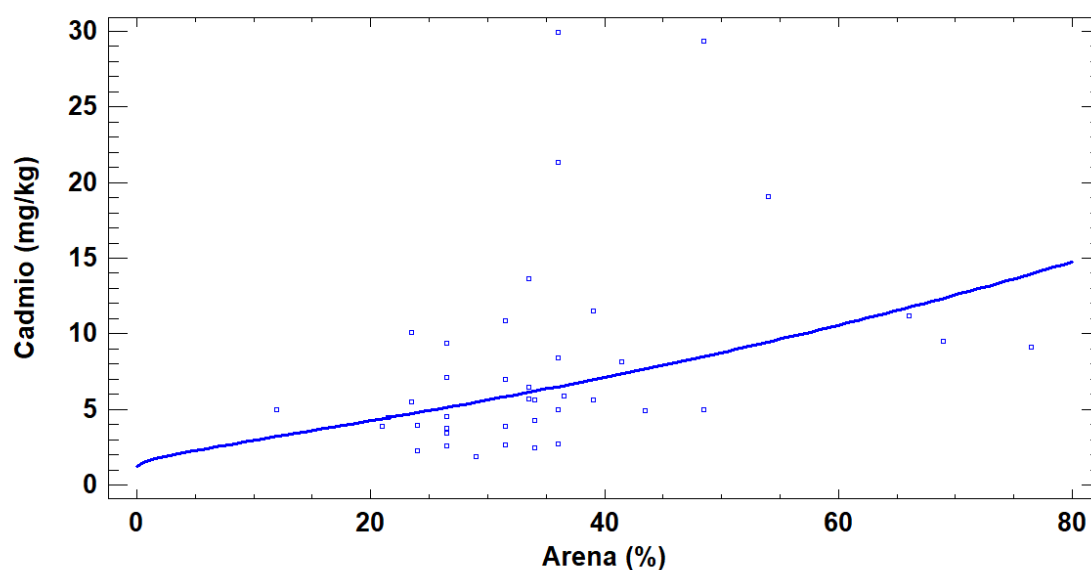


Figura 18. Regresión y correlación entre el contenido de arena y el contenido de cadmio. Capa superficial de suelos del distrito de Leonor Ordoñez, Jauja

Contenido de arcilla (X) y el contenido de cadmio (Y)

Prueba de Hipótesis:

Ho: $\beta = 0$ No hay regresión

Ha: $\beta \neq 0$ Si hay regresión

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Tabla 31.

Análisis de variancia de la regresión entre el contenido de arcilla (X) y el contenido de cadmio (Y) en la capa superficial de los suelos (0 – 20 cm) del distrito de Leonor Ordoñez

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculada	p-valor
Regresión	3,483	1	3,483	9,4400	0,0039
Error	14,016	38	0,369		
Total	17,498	39			

Ecuación de regresión: Exponencial $Cd = \exp(a + b * \text{arcilla})$

Se rechaza Ho y se acepta Ha. Si hay regresión

$$Cd = \exp(2.80429 - 0.0295615 \cdot \text{Arcilla}) \quad r = -0,4461 \quad r^2 = 0,1990$$

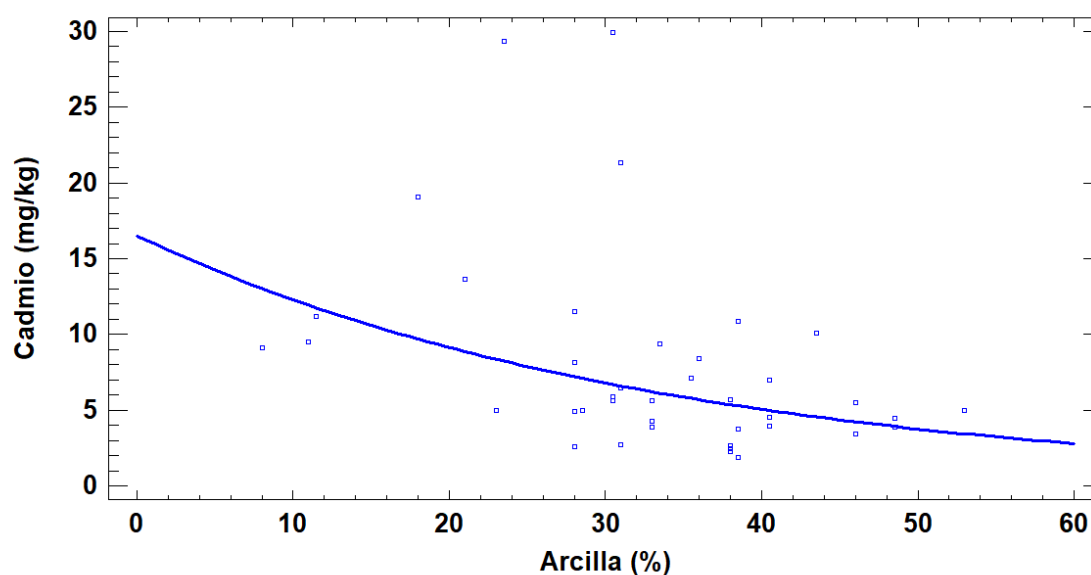


Figura 19. Regresión y correlación entre el contenido de arcilla y el contenido de cadmio. Capa superficial de suelos del distrito de Leonor Ordoñez, Jauja

Contenido de Cadmio (X) y el pH (Y)

Prueba de Hipótesis:

Ho: $\beta = 0$ No hay regresión

Ha: $\beta \neq 0$ Si hay regresión

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Tabla 32.

Análisis de variancia de la regresión entre el pH (X) y el contenido de cadmio (Y) en la capa superficial de los suelos (0 – 20 cm) del distrito de Leonor Ordoñez

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculada	p-valor
Regresión	220730	1	220730	6,18	0,0174
Error	1,35742E6	38	35721,4		
Total	A,57814E6	39			

Ecuación de regresión: Cuadrado Y Inversa X $Cd = \sqrt{-3900,69 + 32060,3/pH}$

Se rechaza Ho y se acepta Ha. Si hay regresión

$$Cd = \sqrt{-3900.69 + 32060.3/pH} \quad r = 0,3740 \quad r^2 = 0,1399$$

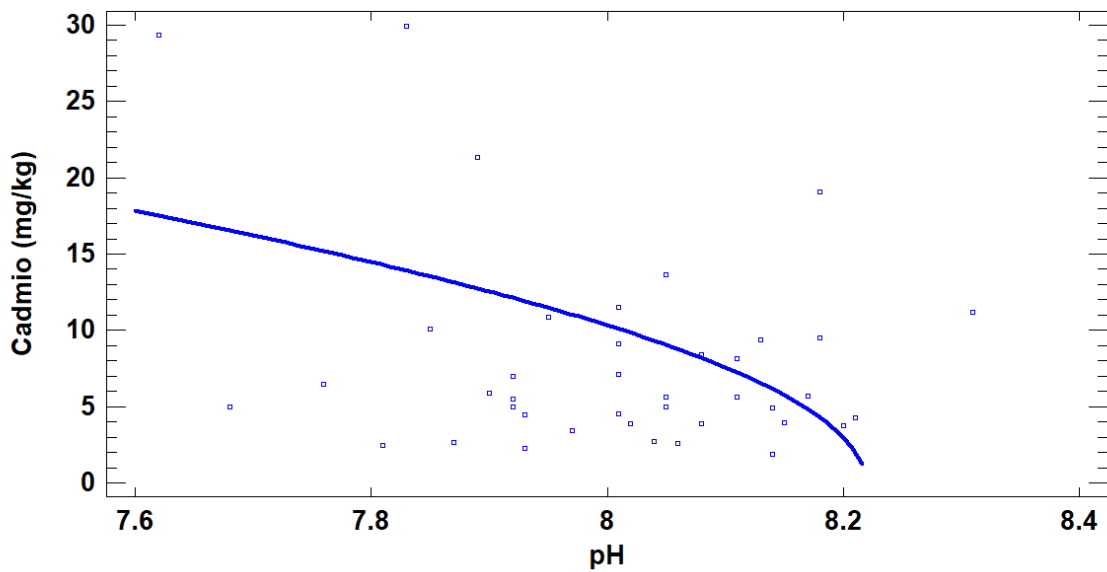


Figura 20. Regresión y correlación entre el pH y el contenido de cadmio. Capa superficial de suelos del distrito de Leonor Ordoñez, Jauja

Contenido de Cadmio (X) y la conductividad eléctrica (Y)

Prueba de Hipótesis:

Ho: $\beta = 0$ No hay regresión

Ha: $\beta \neq 0$ Si hay regresión

Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

Tabla 33.

Análisis de variancia de la regresión entre la CE (X) y el contenido de cadmio (Y) en la capa superficial de los suelos (0 – 20 cm) del distrito de Leonor Ordoñez

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F Calculada	p-valor
Regresión	581122,00	1	581122,00	22,15	0,000
Error	997023,00	38	26237,40		
Total	1,57814E6	39			

Ecuación de regresión: Cuadrado doble $Cadmio = \sqrt{(a + b \cdot CE^2)}$

Se rechaza Ho y se acepta Ha. Si hay regresión.

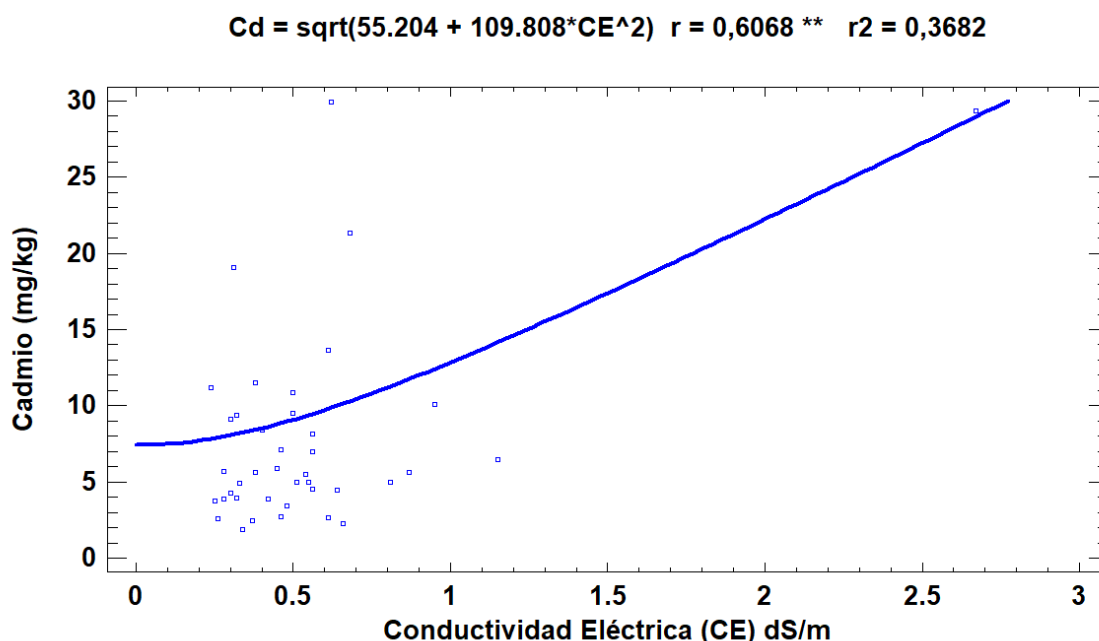


Figura 21. Regresión y correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido de Cd. Capa superficial de suelos del distrito de Leonor Ordoñez, Jauja

4.2. Discusión de resultados

El contenido de cadmio (Cd) en los suelos del distrito de Leonor Ordoñez varía entre 1,88 y 29,92 mg.kg⁻¹, con un promedio de 7,93 mg.kg⁻¹, además presentan mucha variabilidad, con un CV de 82,98%, estos datos se presentan en la Tabla 10, y se puede apreciar que superan el ECA de suelos del Perú, (52) que está en 1,4 mg Cd.kg⁻¹, (52) indicando que son suelos contaminados con Cd hasta en más de 20 veces [Cd máximo = (29,91/1,4) = 21,36], estos datos se representan en la Figura 5, los cuales son similares a lo reportado en el artículo de investigación titulado “*Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils*”, donde las mayores concentraciones de Cd se encontraron en los 30 cm superiores de los suelos arables comparados con los suelos forestales. (31) Es la capa superficial de los suelos agrícolas donde se concentran la mayor cantidad de contaminantes, como es el caso de los suelos del distrito de Leonor Ordoñez. Estas altas concentraciones de metales pesados, tienen como fuente principal las actividades antropogénicas; pues a pesar de que la concentración natural de metales pesados en los suelos dependa primariamente del tipo y constitución de los materiales parentales de los cuales se deriva el suelo; son las entradas antropogénicas las que pueden conducir a concentraciones que exceden a las fuentes naturales. (33)

El contenido de arcilla de los suelos contaminados con Cd del distrito de Leonor Ordóñez varió entre 8,00 y 53,00%, con un promedio de 32,99% y una mediana de 33%. La Mediana divide a las 40 muestras en dos partes iguales. El coeficiente de variación es alto, lo que evidencia la heterogeneidad del contenido de arcilla en estos suelos. Los datos se presentan en la Tabla 11 en la cual se puede apreciar que los contenidos de arcilla encontrados en los suelos son superiores, en promedio, al 30%, que caracteriza a suelos de textura moderadamente fina a fina (franco arcillo arenoso, franco arcillo limoso, franco arcilloso, arcilla arenosa, arcilla limosa y arcilla). Uno de los fenómenos superficiales en los que influye el contenido de arcilla es la adsorción de productos químicos disueltos, que son atraídos a las superficies de partículas minerales. A mayor área superficial, mayor será la capacidad del suelo de adsorber productos químicos y nutrientes. (32)

El contenido de arena en los suelos del distrito de Leonor Ordóñez varió entre 12,00 y 76,50%, con un promedio de 35,20% y un alto coeficiente de variación, de 37,12%, lo que demuestra una alta heterogeneidad de los datos. Los datos se presentan en la Tabla 12 y Figura 7. En ellas se observa que el promedio del contenido de arena es superior al contenido de arcilla de estos suelos, indicando que los suelos tienen menor capacidad de retención de agua y de almacenar nutrientes (54); además están asociadas con la arena una alta tasa de drenaje, un bajo nivel de materia orgánica, entre otras calificaciones. (32)

El contenido de limo en los suelos del distrito de Leonor Ordóñez varió entre 15,50 y 45,50%, con un promedio de 31,81% con un coeficiente de variación inferior al de la arena y la arcilla, indicando menor variabilidad respecto a las otras dos separatas del suelo. Los datos se presentan en la Tabla 13 y Figura 8. Esta fracción granulométrica del suelo, de tamaño intermedio entre la arena y la arcilla, está asociada a una capacidad de retención de agua media-alta, aireación media, lenta a media tasa de drenaje, medio a alto contenido de materia orgánica y moderada descomposición de la materia orgánica, entre otras calificaciones. (32)

La densidad aparente varió entre 1,03 y 1,59 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, con un promedio de 1,17 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, lo cual está indicando que los suelos tuvieron predominantemente textura fina a media, antes que textura gruesa; el coeficiente de variación fue bajo, indicando relativa homogeneidad de los datos evaluados. Los datos se presentan en la Tabla 13 y Figura 9. Estos datos nos informan que los suelos no están compactados, no hay limitaciones para la emergencia de plantas, así como se facilita el enraizamiento y la circulación del agua y del aire. (54) Se agrega que, la mayor proporción de espacio poroso a sólido, genera en los suelos menor densidad de volumen, y cualquier factor que afecte el espacio poroso afecta la densidad de volumen. (32)

El contenido de humedad de los suelos de Leonor Ordóñez, en el nivel de humedad de capacidad de campo, estuvo en el rango de 19,29 y 30,98%, con un promedio de 24,16%, y bajo coeficiente de variación, lo que indica baja heterogeneidad de los datos. Estos se presentan en la Tabla 15 y Figura 10. Estos valores de capacidad de campo indican que el suelo retiene suficiente agua útil para las plantas, y tiene suficiente espacio poroso lleno de aire para permitir la suficiente aireación de los microorganismos del suelo y su actividad. (32)

La porosidad total del suelo varió entre 39,68 y 52,94%, con un promedio de 46,31%, con un bajo coeficiente de variación, que indica baja heterogeneidad de los datos. Estos se presentan en la Tabla 16 y Figura 11. La variación de la porosidad es parte de esta propiedad del suelo, y tiene relación con la variación de la densidad de volumen. En el distrito de Leonor Ordóñez se encuentran en el rango teórico propuesto de 25 a 60%, (32) dándole a estos suelos buenas propiedades físicas de aireación, baja compactación y condiciones adecuadas para el crecimiento de los organismos del suelo y las raíces de las plantas.

Los valores de pH de los suelos del distrito de Leonor Ordóñez variaron entre 7,62 y 8,31; con un promedio de 8,01 calificado como moderadamente alcalino, con un coeficiente de variación bajo, de 1,86%, mostrando la baja heterogeneidad de los datos. Los datos se presentan en la Tabla 17. De los datos evaluados, se observó que la mayor proporción de suelos tienen pH

moderadamente alcalino ($\text{pH} = 7,8 - 8,4$), representando el 92,5% con un total de 37 suelos. Una baja proporción de suelos, el 7,5% que representan 3 muestras de suelos tienen pH ligeramente alcalino ($\text{pH} = 7,0 - 7,8$). Los datos se presentan en la Tabla 18 y Figura 12. La alcalinidad observada en estos suelos infiere una mayor descomposición de la materia orgánica del suelo, proceso realizado principalmente por bacterias que predominan en suelos alcalinos, baja actividad de hongos, mayor acumulación de carbonato de calcio, y mayor crecimiento de plantas que prefieren estos pH alcalinos, como son las leguminosas (fijación de nitrógeno atmosférico) y gramíneas. (54)

Los valores de CE, como una expresión de la concentración de sales solubles en el suelo, mostró una variación entre 0,24 y 2,67 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, con un promedio de 0,55 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, con un alto coeficiente de variación, de 72,88% que indica la alta heterogeneidad de los datos. Los datos se presentan en la Tabla 19. La clasificación de los suelos en base a la CE (Anexo 2), indicó que el 98% de los suelos están calificados como no salinos ($\text{CE} = 0 - 2,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), representando a 39 muestras. Solo una muestra es calificada como muy ligeramente salina ($\text{CE} = 2,00 - 4,00 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), que representa el 2% de los datos. Esto esquematiza a suelos predominantemente no salinos. Estos datos se presentan en la Tabla 20 y Figura 13.

La CIC del suelo varió entre 12,56 y 15,12 $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un promedio de 13,73 $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un coeficiente de variación de 4,51, calificado como bajo, que indica homogeneidad de los datos evaluados. Los datos se presentan en la Tabla 21. La calificación de la CIC del suelo, indica un nivel moderadamente alto ($\text{CIC} = 12,00 - 20,00 \text{ cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$) para el 100% de las muestras analizadas, que indica el aporte de los dos coloides del suelo: la arcilla y el humus; en menor extensión, el limo (56) (57) en esta propiedad química del suelo. Los datos se presentan en la Tabla 22 y Figura 14. El nivel de CIC del suelo permite inferir que la adsorción de Cd al suelo se puede ver limitada, pues no se tienen valores altos, para inmovilizar el cadmio. La adsorción en el sistema suelo depende principalmente de los parámetros fisicoquímicos, especialmente el pH y el material adsorbente. (33)

El contenido de materia orgánica varió desde 0,77% hasta 3,46%, con un promedio de 2,19%, con un coeficiente de variación alto, de 33,69 %, que indica alta heterogeneidad de los datos. Los resultados analizados se presentan en la Tabla 23. La calificación del contenido de materia orgánica muestra que la mayor proporción de datos tiene valores medios (MO = 2,00 – 4,00 %), que comprende a 23 muestras y el 57,5% del total. Las demás muestras de suelo tienen valores bajos (MO = 0,0 – 2,0 %), representando el 42,5% del total, con 17 muestras. Los datos se presentan en la Tabla 24 y Figura 15. Los contenidos medios a bajos encontrados en los suelos del distrito de Leonor Ordóñez limitan las mejoras del suelo en otras propiedades como son: capacidad de intercambio catiónico y capacidad de retención de agua; además de formación y estabilidad de los agregados del suelo, y la energía para el crecimiento de organismos y plantas. Por estas razones la materia orgánica es central en la calidad del suelo. (32) Por lo tanto, los suelos de Leonor Ordoñez tienen limitada calidad.

El contenido de P disponible varió entre 9,08 y 46,87 mg.kg⁻¹ con un promedio de 26,92 mg.kg⁻¹, con un coeficiente de variación alto, de 41,94%, que indica alta heterogeneidad de los datos. Los resultados procesados se presentan en la Tabla 25. La clasificación del contenido de P muestra que la mayor proporción (85%) contiene a los suelos con contenido alto (P > 14 mg.kg⁻¹), con un total de 34 muestras. Solo 6 datos, que representan el 15% del total, tienen contenido medio de P. No se presentan suelos con contenido bajo (P < 7 mg.kg⁻¹). Estos datos se presentan en la Tabla 26 y Figura 16. El contenido alto de P encontrado en estos suelos puede inferirse que proviene de las aplicaciones continuas que hacen los agricultores de este nutriente al suelo, en forma de fertilizantes. Considerando que el contenido de P es más bajo en regiones tropicales húmedas comparado a suelos de regiones áridas o semiáridas, (63) puede sustentar los valores hallados, pero se requiere comprender las relaciones e interacciones del P en los suelos y los factores que influyen su disponibilidad para el manejo eficiente de este elemento y protección de la calidad del agua. (63)

El contenido de potasio disponible varió entre 194 y 242 mg.kg⁻¹, con un promedio de 219,45 mg.kg⁻¹ y un coeficiente de variación bajo, de 5,57% que

indica homogeneidad de los datos. Los resultados analizados se presentan en la Tabla 27. La calificación del K disponible muestra que la mayor proporción, el 97,5%, se encuentra en un nivel medio ($K = 100 - 240 \text{ mg.kg}^{-1}$), representado por 39 datos. Solo un dato presenta contenido alto ($K > 240 \text{ mg.kg}^{-1}$), que representa el 2,5% del total. Los datos se presentan en la Tabla 28 y Figura 17.

Al relacionar el contenido de cadmio con cada una de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de Leonor Ordóñez se encontró correlación significativa entre el contenido de cadmio y porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, pH y conductividad eléctrica (CE); con las demás propiedades del suelo no se encontró significación estadística. Para la relación entre el cadmio y porcentaje de arcilla, la correlación es negativa ($r = - 0,4461$), indicando una relación inversa, cuando aumenta el contenido de cadmio disminuye la proporción de arcilla; para la correlación entre el cadmio y el porcentaje de arena, pH y CE, la correlación es positiva, indicando que cuando aumenta el contenido de cadmio, también aumenta la arena, el pH y la CE. Los datos se presentan en la Tabla 29.

El análisis de regresión mostró que, para la regresión entre Cd y contenido de arena, se ajustó a la ecuación del siguiente tipo:

$$Cd = \exp(a + b * \sqrt{\text{arena}})$$

Los datos encontrados son diferentes al trabajo de investigación titulado: *“Estimates of ambient background concentrations of trace elements in soils for risk assessment”*, donde se observó que las concentraciones de cadmio incrementaron con la disminución del porcentaje de arena ya que el Cd está asociado con las partículas finas y, por lo tanto, la textura del suelo puede ser usada para mejorar el estimado de valores de cadmio en el suelo. (36) Esto se puede explicar debido a que el Cd en el suelo no se adsorbe a las partículas de arena (51) y queda en solución, incrementando sus concentraciones en el suelo. Los datos se presentan en la Tabla 30 y Figura 18.

La regresión entre el contenido de arcilla y el contenido de cadmio resultó altamente significativa, e inversa, con una ecuación de regresión estimada del siguiente tipo:

$$Cd = \exp(a + b \cdot \text{arcilla})$$

La regresión es inversa, cuando aumenta el porcentaje de arcilla, disminuye la concentración total de cadmio en el suelo, debido a la adsorción e inmovilización del cadmio en el suelo, al ser adsorbido a las partículas de arcilla. (33) Los datos se presentan en la Tabla 31 y Figura 19.

La regresión entre el Cd y el pH del suelo fue altamente significativa, ajustando a una ecuación del tipo cuadrado Y inversa X:

$$Cd = \sqrt{-3900,69 + 32060,3/pH}$$

Con un coeficiente de determinación relativamente débil. Esto muestra que cuando el pH aumenta, la concentración de Cd en el suelo disminuye, lo que se puede atribuir a que se generan precipitados por el pH alcalino y las altas concentraciones de Cd encontradas en estos suelos. Los datos analizados se presentan en la Tabla 32 y Figura 20.

Estos resultados son similares a lo encontrado en el trabajo de investigación titulado: "*Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils*", donde se reportó que la concentración de cadmio disminuyó con el incremento de pH. (31)

La regresión entre el contenido de Cd y la conductividad eléctrica (CE) fue altamente significativa, ajustando los datos, a una ecuación cuadrada doble:

$$Cadmio = \sqrt{(a + b \cdot CE^2)}$$

Estos resultados indican que cuando se incrementa la CE disminuye la concentración de Cd en los suelos del distrito de Leonor Ordóñez. Los datos analizados se presentan en la Tabla 33 y Figura 21.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades físicas de los suelos contaminados con cadmio del distrito de Leonor Ordóñez presentaron las siguientes características:
 - A. El contenido de arena varió entre 12,0 y 76,50% con un promedio de 35,20%, con un coeficiente de variabilidad de 37,12, calificado como alto.
 - B. El Limo en los suelos agrícolas del distrito de Leonor Ordóñez varió entre 15,50 y 45,50%, con un promedio de 31,81%, con un coeficiente de variación inferior al de la arena y la arcilla.
 - C. El contenido de arcilla fue ampliamente variable, entre 8 y 53%, con un promedio de 32,99% y un coeficiente de variación alto.
 - D. La densidad aparente varió entre 1,03 y 1,59 mg.m^{-3} con un promedio de 1,17 mg.m^{-3} , con bajo coeficiente de variación.
 - E. La porosidad total del suelo varió entre 39,68 y 52,94%, con un promedio de 46,31%.
 - F. El nivel de humedad del suelo a capacidad de campo varió entre 19,29 y 30,98%, con un promedio de 24,16% y bajo coeficiente de variación.
2. Las propiedades químicas evaluadas en los suelos del distrito de Leonor Ordóñez, contaminados con Cadmio, tuvieron las siguientes características:
 - A. El pH varió entre 7,62 y 8,31; siendo predominante el rango de 7,8 a 8,4 que califica a los suelos como moderadamente alcalinos.
 - B. La conductividad eléctrica varió entre 0,24 y 2,67 dS.m^{-1} , predominando los suelos no salinos ($\text{CE} = 0 - 2 \text{ dS.m}^{-1}$).

- C. El contenido de materia orgánica varió entre 0,77 y 3,46% que comprende a niveles bajos y medios.
- D. La capacidad de intercambio catiónico varió entre 12,56 y 15,12 $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$, calificados como de CIC moderadamente alta.
- E. El contenido de P disponible en los suelos de la capa superficial fue calificado como alto en un 85% de las muestras y solo un 15% de contenido medio.
- F. El contenido de potasio disponible varió entre 194 y 242 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, siendo predominantes los contenidos medios ($K = 100 - 240 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) representando el 97,5%.
3. Se encontró correlación y regresión significativa entre el contenido de cadmio en el suelo (X) y el contenido de arcilla, contenido de arena, pH y conductividad eléctrica; que pueden ser utilizadas para predecir el contenido de cadmio en estos suelos agrícolas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la caracterización fisicoquímica de otros suelos contaminados con cadmio en el valle del Mantaro, con el fin de determinar las variables que influyen en su contenido.
2. Incluir en estudios de caracterización de suelos contaminados indicadores microbiológicos, que ayudarán a conocer el efecto del contaminante en los suelos agrícolas y de este modo se puedan ampliar posibles soluciones para la disminución del cadmio en el suelo agrícola.
3. Analizar las fracciones del cadmio en el suelo, que están unidas a la materia orgánica, las arcillas, los óxidos e hidróxidos, así como la fracción soluble e intercambiable, para determinar la distribución del cadmio total en el suelo, del mismo modo se sugiere el uso de diferentes métodos para la reducción de cadmio en los suelos agrícolas, entre ellos se pueden mencionar el uso de la fitoestabilización de cadmio mediante el uso de *lupinus mutibilis* mediante el uso de estiércol de lombriz. (85)

BIBLIOGRAFÍA

1. **FLICK, D.F., KRAYBILL, H.F. and DIMITROFF, J.M.** *Toxic effects of cadmium: A review*. 2, Washington : Environmental Research, 1971, Vol. 4, pp. 71-85.
2. **DOMY, Adriano.** *Trace elements in the terrestrial environment*. 2. New York : Springer Science, 1986. p. 866. ISBN 978-1-4684-9505-8.
3. **SÁNCHEZ, Martín and SÁNCHEZ, Camazano.** *Adsorption and mobility of cadmium in natural, uncultivated soils*. 4, Salamanca : Environmental Quality, octubre 1993, Vol. 22, pp. 737-742.
4. **BOEKHOLD, A.E., TMMINGHOFF, E.J.M. and VAN DER ZEE, S.E.A.T.M.** *Influence of electrolyte composition and pH on cadmium sorption by an acid sandy soil*. Wageningen, The Netherlands : Journal of Soil Science, 1993, Vol. 44, pp. 85-96.
5. **JARVIS, S.C. and JONES, L.H.P.** *The contents and sorption of cadmium in some agricultural soils of England and Wales*. Inglaterra : Journal of Soil Science, 1980, Vol. 31, pp. 469-479.
6. **PETRUZELLI, G., GUIDI, G. and LUBRANO, L.** *Organic matter as an influencing factor on copper and cadmium adsorption by soils*. Pisa, Italia : Water, Air and Soil Pollution, 1978, Vol. 9, pp. 263-269.
7. **ADHIKARI, T. and SINGH, M.V.** *Cadmium sorption characteristics of mayor soils of India in relation to soil properties*. Bhopal, India : Journal of the Indian Society of Soil Science, 2000, Vol. 48, pp. 757-762.
8. **RIFFALDI, Riccardo and LEVI-MINZI, Renato.** *Adsorption and desorption of cadmium on humic acid fraction of soils*. Toscana, Italia : water, Air and Soil Pollution, 1975, Vol. 5, pp. 179-184.
9. **YUAN, G. and LAVKULICH, L.M.** *Sorption behavior of copper, zinc, and cadmium in response to simulated changes in soil properties*. Vancouver, Canadá : Communications in Soil Science and Plant Analysis, noviembre 11, 2008, Vol. 28, pp. 571-587.
10. **REID, D. Jonathan and MCDUFFIE, Bruce.** *Sorption of trace cadmium on clay minerals and river sediments: Efects of pH and Cd (II) concentrations in a synthetic river water medium*. New York, USA : Water, Air and Soil Pollution, 1981, Vol. 15, pp. 375-386.
11. **KIM, N.D. and FERGUSSON, J.E.** *Adsorption of cadmium by an Aquent New Zealand soil and its components*. Canterbury, Nueva Zelanda : Australian Journal of Soil Research, 1992, Vol. 30, pp. 159-167.

12. **TILLER, K.G., GERTH, J. and BRUEMMER, G.** *The relative affinities of cadmium, nickel and zinc for different soil clay fractions and goethite.* 1, Amsterdam, Holanda : Geoderma, Setiembre 1984, Vol. 34, pp. 17-35.
13. **JURY, W.A.** *Spatial Variability of soil physical parameters in solute migration: a critical literature review.* Palo Alto : Dept. of Soil and Environmental Sciences, 1985.
14. **JACQUES, Diederik, et al.** *Analysis of steady state chloride transport through two heterogeneous filed soils.* 10, s.l. : Water Resources Research, 1998, Vol. 34, pp. 2539-2550.
15. **VAN DER ZEE, S.E.A.T.M. and VAN RIEMSDIJK, W.H.** *Transport of reactive solutes in spatially variable soil systems.* 11, Wageningen : Water Resources Research, Noviembre 1987, Vol. 23, pp. 2059-2069.
16. **STAESSEN, J.A. et al.** *Environmental exposure to cadmium, forearm bone density and risk of fractures: prospective population study.* 9159, Bélgica : Lancet, Abril 3, 1999, The Lancet, Vol. 353, pp. 2059-2069.
17. **EKLUND, Gunilla and OSKARSSON, Agneta.** *Exposure of cadmium from infant formulas and weaning foods.* 12, Upsala, Suecia : s.n., Noviembre 10, 2010, Food Additives and Contaminants, Vol. 16, pp. 509-519.
18. **JINADASA, K.B.P. et al.** *Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia.* 4, Sydney, Australia : s.n., Julio 1, 1997, Journal of Environmental Quality, Vol. 26, pp. 924-933.
19. **ELESCANO, Cristóbal.** Evaluación de las concentraciones de cadmio en las hojas de maíz en relación a su disponibilidad en suelos de diferente pH en el valle del Mantaro. Huancayo, Junín, Perú : s.n., Febrero 1, 2018. p. 144.
20. **BUOL, S.W. et al.** *Soil Genesis and Classification.* 6. Iowa : Wiley-Blackwell, 2011. p. 556.
21. **ALLOWAY J., Brian [ed.].** *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability.* 3. s.l. : Springer, 2013. p. 614. ISBN 978-94-007-4469-1.
22. **THOMAS H., Christensen.** *Cadmium soil sorption at low concentrations: VIII. Correlation with soil parameters.* 1-2, Kongens Lyngby : s.n., Febrero 16, 1989, Water, Air and Soil Pollution, Vol. 4, pp. 71-82.
23. **CHLOPECKA, Anna et al.** *Forms of Cadmium, Lead, and Zinc in Contaminated Soils from Southwest Poland.* 1, Tarnowskie Góry, Polonia : s.n., Enero 1, 1996, Journal of Environmental Quality, Vol. 25, pp. 69-79.
24. **MCBRIDE, M., SAUVE S. and HENDERSHOT, W.** *Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils.* 2, Québec, Canadá : s.n., Enero 16, 1997, European Journal of Soil Science, Vol. 48, pp. 337-346.

25. **MA Q., Lena, TAN, Fang and HARRIS G., Willie.** *Concentrations and Distributions of Eleven Metals in Florida Soils.* 3, Florida : s.n., Mayo 1, 1997, Journal of environment Quality, Vol. 26, pp. 769-775.
26. **ZAVALETA GARCIA, Amaro.** *El suelo en relación con la producción.* 1. Lima : CONCYTEC, 1992. p. 223.
27. **ROOTZÉN, Helle et al.** *Correlation of Cadmium Distribution Coefficients to Soil Characteristics.* 1, Enero 1, 2003, Journal of environmental Society, Vol. 32, pp. 138-145.
28. **WU, J. et al.** *Spatial Variability of Grain Cadmium and Soil Characteristics in a Durum Wheat Field.* 1, Dakota del Norte : s.n., Enero 1, 2002, Soil Science Society of America Journal, Vol. 66, pp. 268-275.
29. **BURGOS, Pilar et al.** *Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation.* 1-2, Sevilla, España : Elsevier, enero 21, 2005, Geoderma, Vol. 130, pp. 157-175.
30. **ADAMS, M.L. et al.** *Predicting cadmium concentrations in wheta and barley grain using soil properties.* 2, marzo 1, 2004, Journal of Environmental Quality, Vol. 33, pp. 532-541.
31. **ANDERSEN K., Martin et al.** *Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils.* 6, Dinamarca : s.n., Noviembre 1, 2002, Soil Science Society of , Vol. 66, pp. 1829-1835.
32. **WEIL R., Raymond and BRADY C., Nyle.** *The Nature and Properties of Soils.* [ed.] Global Edition. 15. s.l. : Pearson Education Limited, 2016. p. 1105. ISBN: 1292162236,9781292162232.
33. **MIRSAL A., Ibrahim.** *Soil pollution. Origin, monitoring & remediation.* Nueva York : Springer, 2004. p. 262. ISBN 978-3-662-05402-4 .
34. **WIM, Salomons and Förstner, U.** *Metals in the Hydrocycle.* 1. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo : Springer, 1984. p. 359. ISBN-13: 978-3-642-69327-4 .
35. **SMOLDERS, E. et al.** *Cadmium Fixation in Soils Measured by Isotopic Dilution.* 1, Enero 1, 1999, Soil Science Society of America Journal, Vol. 63, pp. 78-85.
36. **ZHAO, F.J., MCGRATH, S.P. and MERRINGTONB, G.** *Estimates of ambient background concentrations of trace metals in soils for risk assessment.* 1, Oxon : Elsevier, octubre 19, 2006, Environmental Pollution, Vol. 148, pp. 221-229.
37. **HOLMGREN, G.S. et al.** *Zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America.* G 2, Abril 1, 1993, Journal of Environmental Quality, Vol. 22, pp. 335-348.

38. **LALOR C., Gerald.** *Review of cadmium transfers from soil to humans and its health effects in the Jamaican environment.* 1-3, Kingston : Elsevier, agosto 1, 2008, Science of the Total Environment, Vol. 400, pp. 162-172.
39. **GARRET G., Robert, PORTER R.D., Anthony and HUNT A., Patricia. [ed.]** *An occurrence of cadmiferous phosphorite soil concretions in Jamaica.* ELSEVIER. 7, Mandeville : s.n., Julio 2010, Applied Geochemistry, Vol. 25, pp. 1047-1055.
40. **TRAINA, S.J.** *The environmental chemistry of cadmium. Cadmium in soils and plants.* [ed.] McLaughlin M. J. and Singh B. R. . s.l. : Springer, Dordrecht, 1999. p. 282. Vol. 85. 978-94-010-5916-9.
41. **MUNN, Sharon et al.** *European Union Risk Assessment Report - Part 1 - Environment - Cadmium Oxide and Cadmium Metal.* Italia : Institute for Health and Consumer Protection, 2007. p. 678. Vol. 72. ISSN 1018-5593.
42. **SALMINEN, R.** *Geochemical Atlas of Europe. Part 1: Background Information, Methodology and Maps.* Espoo : Geological Survey of Finland, 2005. p. 526. ISBN 9516909213.
43. **MCLAUGHLIN, M.J. et al.** *Review: the behaviour and environmental impact of contaminants in fertilizers.* 1996, Australian Journal of Soil Research, Vol. 34, pp. 1-54.
44. **JINGSHENG, Chen et al.** *Background concentrations of elements in soils of China. Water Air Soil Pollut.* s.l. : Springer, Agosto 1991, Air Quality, Atmosphere and health, Vol. 57, pp. 699–712.
45. **WORLD BUREAU OF METAL STATISTICS.** *World Nickel/Tin/Cadmium statistics - Cadmium.* World Bureau of Metal Statistics. s.l. : WBMS, 2009.
46. **GROSBOIS A., Cécile et al.** *The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits.* 1-3, s.l. : Elsevier, Junio 17, 2005, Science of the Total Environment, Vol. 356, pp. 22 – 37.
47. **NZIGUHEBA, Generose and SMOLDERS, Erik.** *Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries.* 1, Lovaina : ELSEVIER, Octubre 29, 2007, Science of the Total Environment, Vol. 390, pp. 53-57.
48. **CHEN, Weiping et al. [ed.] CARTER M.R.** *Characterizing the solid–solution partitioning coefficient and plant uptake factor of As, Cd, and Pb in California croplands.* 1-3, California : Elsevier, Octubre 9, 2008, Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 129, pp. 212-220.
49. **CHRISTENSEN H., Thomas y CHRISTENSEN, H.** *Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium.* Kongens Lyngby : s.n., Enero 1984, Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 21, pp. 105–114.

50. **FARRAH E., Helen, HATTON, Denise and FREDERICK PICKE, William.** *The affinity of metal ions for clay surfaces.* Newcastle : ELSEVIER, Abril 1, 2003, Chemival Geology, Vol. 28, pp. 55-68.
51. **JURGEN, Buekers, et al.** *Modelling the effects of ageing on Cd, Zn, Ni and Cu solubility in soils using an assemblage model.* 6, Lovaina : s.n., noviembre 19, 2008, European Journal of Soil Science, Vol. 59, pp. 1160-1170.
52. **MINAM.** Estándares de Calidad Ambiental para suelo. [ed.] Ministerio del Ambiente-Perú. *El Peruano.* Diciembre 2, 2017, pp. 12-15.
53. **YARON, Bruno, CALVET, Raoul and PROST, René.** *Soil Pollution: Processes and Dynamics.* Versalles : Springer, 1996. ISBN: 978-3-642-64716-1,978-3-642-61147-6.
54. **PORTA CASANELLAS, Jaime , ROQUERO DE LABURU, Carlos and LÓPEZ-ACEVEDO REGUERÍN, Marta.** *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* 3. Madrid : Mundi-Prensa, 1994. ISBN: 84-7114-468-9.
55. **FORSYTHE, Warren.** *Física de Suelos. Manual de Laboratorio.* 2. San José : Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. IICA, 1980. p. 236. ISBN 92-9039-052-2.
56. **MARTEL, Y.A., DE KIMPE, C.R. and LAVERDIERE, M.R.** *Cation-exchange Capacity of Clay-rich Soils in Relation to Organic Matter, Mineral Composition, and Surface Area.* 5, Quebec : s.n., setiembre 1, 1978, Soil Science Society of America Journal, Vol. 42, pp. 764-767. ISSN:1435-0661.
57. **MANRIQUE, L. A., JONES C. A. and DYKE, P.T.** *Predicting Cation-Exchange Capacity from Soil Physical and Chemical Properties.* 3, Mayo 1, 1991, Soil Science Society of America Journal, Vol. 55, pp. 787-794.
58. **FRANK W., Miller.** *Inter-regional predictability of cation-exchange capacity by multiple regression.* . Misisipi : Springer, Agosto 1970, Plant Soil, Vol. 33, pp. 721–725.
59. **KAMPRATH, E.J. and KAMPRATH, E.J.** *Retention and Cation-Exchange Properties of Organic Matter in Coastal Plain Soils.* 3, Carolina del Norte : Division IV—Soil Fertility, mayo 1, 1962, Soil Science Society of America Journal, Vol. 26, pp. 263-265.
60. **PARFITT, R.L., WHITTON J.S. and GILTRAP, D.J.** *Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soil.* 9-10, Palmerston North : s.n., noviembre 11, 2008, Communications in Soil Science and Plant Analysis, Vol. 26, pp. 1343-1355.

61. **SYERS, J.K., CAMPBELL A.S. and WALKER, T.W.** *Contribution of organic carbon and clay to cation exchange capacity in a chronosequence of sandy soils.* Canterbury : Springer, agosto 1970, Plant and Soil, Vol. 33, pp. 104–112.
62. **RAO, S.A., SRINIVASA RAO, Ch. and PAL, S.K.** *Prediction of cation exchange capacity from clay and organic carbon of some smectite and kaolinite rich soil. 2,* Bhopal : s.n., enero 1996, Journal of the Indian Society of Soil Science, Vol. 4, pp. 214-219. ISSN:.
63. **HAVLIN L., John et al.** *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 7.* 2005. ISBN-13:9780130278241.
64. **BLACK, C.A.** *Relaciones suelo-planta.* Buenos Aires : John Wiley & Sons, 1973. Vol. 2.
65. **SMITH, Pete.** *Global climate change and pedogenic carbonates.* [ed.] John M. KIMBLE and Bobby A. STEWART. Bosa Roca : Taylor & Francis Inc, 1999. p. 320. ISBN10: 1566704588.
66. **GAUCHER, G.** *Les facteurs de la pédogenèse. Traité de pédologie agricole. 3,* Lelotte-Dison : Éditions G. Lelotte-Dison, 1981, Géographie physique et Quatenaire, Vol. 36, p. 335.
67. **CRESSER, Malcolm, KILLHAM, Ken and EDWARDS, Tony.** *Soil chemistry and its applications.* Cambridge : Cambridge University Press, 1993. p. 192. ISBN:9780511622939.
68. **MENGEL, Konrad, KIRKBY A., Ernest and KOSEGARTEN, Harald.** *Principles of Plant Nutrition.* [ed.] Konrad MENGEL, et al. 5. s.l. : Springer, 2001. p. 849. ISBN 978-1-4020-0008-9 .
69. **RICHARDS, L.A. [ed.].** *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* Washington : United States Department of Agriculture, 1954. p. 160.
70. **TAN H., Kim.** *Principles of Soil Chemistry.* [ed.] Taylor and Francis Group. 4. s.l. : CRC Press, 2011. p. 390. ISBN: 9781439813928.
71. **AMERICA, Soil Science Society of.** Glossary of Soil Science Terms. [Online] 2008. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>. ISBN: 978-0-89118-851-3.
72. **Journal of Pollution Effects & Control.** [Online] ISSN: 2375-4397.
73. **MISRA, S.G. and MANI, D.** *Soil Pollution.* New Delhi : APH Publishing Corporation, 2012. ISBN 10: 8131304728.
74. **LONDOÑO FRANCO, Luis Fernando, LONDOÑO MUÑOZ, Paula Tatiana and MUÑOZ GARCIA, Fabian Gerardo.** *Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal.* Medellín, Colombia : s.n., mayo 18, 2016, Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, pp. 145 - 153.

75. **BERNAL TORRES, César Augusto.** *Metodología de la investigación*. 3. s.l. : Pearson, 2010. p. 320. ISBN: 978-958-699-128-5.
76. **RAIMUND POPPER, Karl.** *La lógica de la investigación científica*. Madrid : TECNOS, 1980. p. 452. ISBN: 84-309-0711-4 .
77. **SÁNCHEZ FLORES, Fabio Anselmo.** *Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y disensos*. 1, Cuzco : s.n., junio 15, 2019, Revista Digital de Investigación in Docencia Universitaria, Vol. 13, pp. 102-122.
78. **USEPA.** *Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Soils, and Tissues*. 3051A, 1998.
79. **SKOOG A., Douglas, HOLLER F. James, and CROUCH R., Stanley.** *Principios de análisis instrumental*. 6. México : Cengage Learning, 2001. p. 1063. ISBN-13: 978-607-481-390-6.
80. **ARROYO ALIAGA, Jacinto.** *¿Cómo ejecutar un plan de investigación?* s.l. : Fundación para el Desarrollo de las Ciencias, 2012.
81. **PÁEZ W., J.** *El Plan de Tesis*. Lima : Impresiones OLGRAF, 2013.
82. **HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos and BAPTISTA LUCIO, María del Pilar.** *Metodología de la Investigación*. 5. México : McGraw-Hill Educación, 2010. ISBN: 978-607-15-0291-9.
83. **MINAM.** *Guía para el Muestreo de Suelos*. Lima : MINAM, 2014. p. 64.
84. **STATISTICALGRAPHICS.** *Statgraphics Centurion XVI.I*. Rockville, MD : statistical graphics system, 2010.
85. **HINOSTROZA ZÁRATE, Sierlín Camila.** *Fitoestabilización de cadmio por lupinus mutabilis en un suelo contaminado del distrito El Mantaro*. Jauja : s.n., 2016.
86. **WILKENS, B.J. and LOCH, J.P.G.** *Accumulation of cadmium and zinc from diffuse immision on acid sandy soils, as a function of soil composition*. Utrech, Holanda : Water, Air and Soil Pollution, mayo 1997, Vol. 96, pp. 1-16.
87. **HARTWIG, A. et al. A.** *Interference by toxic metal ions with DNA repair processes and cell cycle control: molecular mechanisms*. 5, Newcastle : s.n., octubre 2010, Environmental Health Perspectives, Vol. 10, pp. 797–799.
88. **SZÁKOVÁ, Jiřina et al.** *The sequential analytical procedure as a tool for evaluation of As, Cd and Zn mobility in soil*. Praga : Springer, noviembre 20, 1988, Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, Vol. 363, pp. 594–595.
89. *Les Facteurs de la Pédogenese*.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de los análisis de suelo

Nº	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)	DAP (Mg.m ₃ ⁻¹)	CC (%)	PT (%)	pH	CE (dS.m ⁻¹)	CIC (cmol.kg ⁻¹)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)
1	11.00	69.00	20.00	1.28	26.74	46.15	8.18	0.50	14.32	1.51	23.22
2	8.00	76.50	15.50	1.59	22.66	39.68	8.01	0.30	12.56	2.08	22.75
3	30.50	36.00	33.50	1.14	25.17	44.32	7.83	0.62	14.32	2.66	33.50
4	43.50	23.50	33.00	1.16	28.89	50.00	7.85	0.95	13.36	3.03	14.56
5	28.00	43.50	28.50	1.23	23.29	41.98	8.14	0.33	13.52	1.18	35.80
6	35.50	26.50	38.00	1.09	25.98	45.65	8.01	0.46	15.12	1.92	13.21
7	33.00	34.00	33.00	1.09	25.91	45.65	8.05	0.87	14.32	1.71	9.08
8	33.00	34.00	33.00	1.19	21.85	45.24	8.21	0.30	14.48	1.48	26.53
9	40.50	26.50	33.00	1.12	24.53	47.19	8.01	0.56	13.84	2.72	34.04
10	38.50	31.50	30.00	1.09	29.02	46.74	7.95	0.50	13.68	3.46	44.26
11	30.50	36.50	33.00	1.12	23.82	47.19	7.90	0.45	13.36	3.29	48.31
12	46.00	26.50	27.50	1.10	23.80	48.35	7.97	0.48	13.36	1.24	9.56
13	11.50	66.00	22.50	1.32	19.86	44.74	8.31	0.24	14.32	1.21	10.84
14	18.00	54.00	28.00	1.30	20.74	44.16	8.18	0.31	13.36	1.04	36.21
15	33.00	31.50	35.50	1.16	23.08	46.51	8.02	0.42	12.88	0.77	36.07
16	40.50	24.00	35.50	1.19	21.98	45.24	8.15	0.32	12.56	1.41	28.70
17	38.00	24.00	38.00	1.14	23.60	47.73	7.93	0.66	12.72	1.75	23.56
18	28.00	26.50	45.50	1.16	24.17	46.51	8.06	0.26	13.52	2.02	20.38
19	38.00	34.00	28.00	1.12	26.00	46.07	7.81	0.37	13.68	2.42	17.61
20	48.50	21.50	30.00	1.16	25.13	46.51	7.93	0.64	14.00	1.65	38.24
21	38.00	33.50	28.50	1.16	24.22	47.67	8.17	0.28	13.20	2.42	26.40
22	38.00	31.50	30.50	1.05	27.41	46.32	7.87	0.61	12.88	2.49	19.30
23	23.00	48.50	28.50	1.05	30.98	47.37	7.68	0.81	13.52	2.89	16.93
24	31.00	36.00	33.00	1.11	26.73	45.56	7.89	0.68	13.84	2.05	38.30
25	28.00	39.00	33.00	1.18	19.82	45.88	8.01	0.38	14.64	3.23	30.46
26	40.50	31.50	28.00	1.12	27.45	47.19	7.92	0.56	13.84	1.71	47.43
27	36.00	36.00	28.00	1.15	24.53	44.83	8.08	0.40	13.20	1.98	15.44
28	46.00	23.50	30.50	1.03	29.05	48.45	7.92	0.54	14.80	3.43	11.92
29	30.50	39.00	30.50	1.18	24.85	44.71	8.11	0.38	14.00	1.55	13.55
30	38.50	29.00	32.50	1.19	23.29	46.43	8.14	0.34	13.84	1.68	27.28
31	38.50	26.50	35.00	1.18	22.13	52.94	8.20	0.25	13.68	2.96	27.41
32	53.00	12.00	35.00	1.18	24.97	45.88	8.05	0.51	14.48	2.52	25.11
33	31.00	36.00	33.00	1.12	23.34	47.19	8.04	0.46	13.52	2.19	17.00
34	48.50	21.00	30.50	1.19	20.41	45.24	8.08	0.28	13.68	1.58	27.07
35	31.00	33.50	35.50	1.18	22.89	47.06	7.76	1.15	14.64	3.29	41.08
36	28.50	36.00	35.50	1.18	20.43	49.41	7.92	0.55	13.36	2.89	25.05
37	33.50	26.50	40.00	1.20	24.00	44.58	8.13	0.32	13.52	2.22	41.21
38	23.50	48.50	28.00	1.12	24.54	47.19	7.62	2.67	13.68	3.36	30.19
39	28.00	41.50	30.50	1.16	19.29	48.84	8.11	0.56	13.20	2.02	49.67
40	21.00	33.50	45.50	1.30	19.74	44.16	8.05	0.61	14.48	2.39	19.57

Anexo 2. Escala de interpretación de análisis de suelos

1. Textura¹

Términos Generales		Clase textural	Símbolo	
Suelos	Textura			
Arenosos	Gruesa	Arena	A.	
		Arena franca	A.Fr.	
Francos	Moderadamente gruesa	Franco arenoso	Fr.A.	
		Franco	Fr.	
	Media	Franco limoso	Fr.L.	
		Limoso	L.	
		Moderadamente fina	Franco arcilloso	Fr.Ar.
			Franco arcillo limoso	Fr.Ar.L.
Arcillosos	Fina	Franco arcillo arenoso	Fr.Ar.A.	
		Arcillo arenoso	Ar.A.	
		Arcillo limoso	Ar.L.	
		Arcilloso	Ar.	

2. Profundidad efectiva¹

Término descriptivo	Profundidad (cm)
Muy superficial	< 25
Superficial	25 - 50
Moderadamente profundo	50 - 100
Profundo	100 - 150
Muy profundo	> 150

3. Pendiente²

Pendientes cortas (laderas cortas) %	Pendientes largas (Laderas largas) %
0-4	0 - 2
4-8	2 - 4
8-15	4 - 8
15-25	8 - 15
25-50	15 - 25
50-75	25 - 50
> 75	50 - 75
	> 75

4. Reacción o pH¹

Rangos	Clases
< 5,5	Fuertemente ácido
5,5 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,0	Neutro
7,1 – 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 – 8,4	Moderadamente alcalino
>8,5	Fuertemente alcalino

5. Conductividad eléctrica¹

Clase	Calificación	Conductividad Eléctrica dS/m
0	No salino	0 – 2
1	Muy ligeramente salino	2 – 4
2	Ligeramente salino	4 – 8
3	Moderadamente salino	>8

6. Materia Orgánica²

Nivel	%
Bajo	< 2
Medio	2 – 4
Alto	> 4

7. Fósforo disponible²

Nivel	P (mg/kg)
Bajo	< 7
Medio	7 - 14
Alto	> 14

8. Potasio disponible²

Nivel	K (mg/kg)
Bajo	< 100
Medio	100 – 240
Alto	> 240

9. Capacidad de Intercambio Catiónico³

Nivel	CIC (cmol/kg)
Muy Baja	< 4
Moderadamente Baja	4 – 8
Baja	8 – 12
Moderadamente Alta	12 – 20
Alta	> 20

10. Saturación de bases³

Nivel	Suma de Cationes (%)	Acetato de Amonio (%)
Bajo	< 35	< 50
Alto	> 35	> 50

11. Calcáreo

Nivel	% CaCO ₃
Bajo	< 1
Medio	1 – 5
Alto	5 – 15
Muy alto	>15

12. Saturación de Aluminio³

Nivel	Para cultivos		
	Susceptibles	Tolerantes	Muy tolerantes
Bajo	< 30	< 40	< 60
Alto	> 30	> 40	> 60

(1) Soil Survey Division Staff. 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.

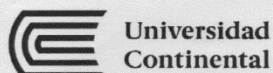
(2) Reglamento de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor, Lima, Perú.

(3) Departamento de Suelos y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria, La Molina 2002.

Anexo 3. Coordenadas de las zonas de muestreo

N.º de muestra	Este	Sur	Altitud (m s. n. m.)
1	0455378	8688862	3311
2	0455384	8688997	3314
3	0455356	8688955	3316
4	0455298	8688931	3311
5	0455337	8688911	3316
6	0455257	8688920	3305
7	0455237	8689090	3319
8	0455245	8688998	3309
9	0455149	8688971	3309
10	0455199	8688916	3303
11	0455308	8689171	3304
12	0455086	8689184	3311
13	0455085	8688271	3315
14	0455047	8688317	3316
15	0454988	8688809	3309
16	0454952	8688869	3308
17	0454878	8688828	3314
18	0454812	8689014	3318
19	0454795	8689095	3321
20	0454860	8689122	3321
21	0454915	8689156	3315
22	0454963	8689224	3311
23	0454928	8689281	3312
24	0455041	8689241	3314
25	0455016	8689294	3310
26	0454873	8688991	3308
27	0454861	8689032	3308
28	0454880	8689077	3311
29	0454856	8689195	3314
30	0454790	8689198	3322
31	0455040	8689183	3318
32	0455017	8689165	3318
33	0454976	8689213	3317
34	0454979	8689259	3318
35	0454952	8689310	3317
36	0454725	8689397	3315
37	0454859	8689455	3312
38	0454842	8689665	3319
39	0455817	8689562	3322
40	0454835	8689507	3321

Anexo 4. Constancia de uso de laboratorio de la UC





El que suscribe jefe de laboratorio de ciencias básicas Ing. Torres Cáceres Carmen Rosa

CONSTANCIA

Hacemos constar que el **Sr. SÁNCHEZ TELLO CHARLES FRANCIS**, identificado con el **DNI 46131634**, hizo uso de los recursos del laboratorio para el desarrollo de la tesis de investigación "**CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS CONTAMINADOS CON CADMIO EN EL DISTRITO DE LEONOR ORDOÑEZ, PROVINCIA DE JAUJA, 2018**" a partir del 5 de marzo hasta el 22 de noviembre del 2019. Habiendo hecho uso de los equipos y materiales con responsabilidad y eficiencia.

Se expide la siguiente constancia que acredita el uso del laboratorio de química de la Universidad Continental.

Huancayo, 17 de diciembre del 2019

Carmen Torres Cáceres
Jefa de Laboratorio de
Ciencias Básicas
Universidad Continental

Ing. Torres Cáceres Carmen Rosa
Jefa de Laboratorio de Ciencias Básicas

Anexo 5. Hoja de recepción de muestras UNALM



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS Y PLANTAS
 Teléfono: 614 7800 Anexo: 222 Teléfono Directo: 349 5622
 Celular: (511) 946 506 254
 e-mail: lab.suelo@lamolina.edu.pe



Hoja 3012

HOJA DE RECEPCION N° 071253 - 2019

SOLICITANTE: Charles Francis Sanchez Telf: 962920232 Fecha: 19-12-19
TELO
 PROCEDENCIA: Departamento: JUNIN Provincia: JHU
 Distrito: Predio:
 MUESTRAS DE: SUELO CANTIDAD: 40

ANALISIS SOLICITADOS	P.U. S/.	US\$
() Análisis Suelo Fertilidad		
() Análisis Suelo Caracterización		
() Análisis Suelo Salinidad		
() Análisis Agua		
() Análisis Foliar		
(X) Otros (Especificar) <u>CARGO TOTAL</u>	<u>30.80</u>	

CANCELADO
19 DIC 2019
 LASPAF - UNALM

Entregado por: Covad A cuenta:
 Recibido por: ELIZABETH QUSPE Total S/ 1,200.00 US\$

Anexo 6. Análisis de cadmio en el suelo

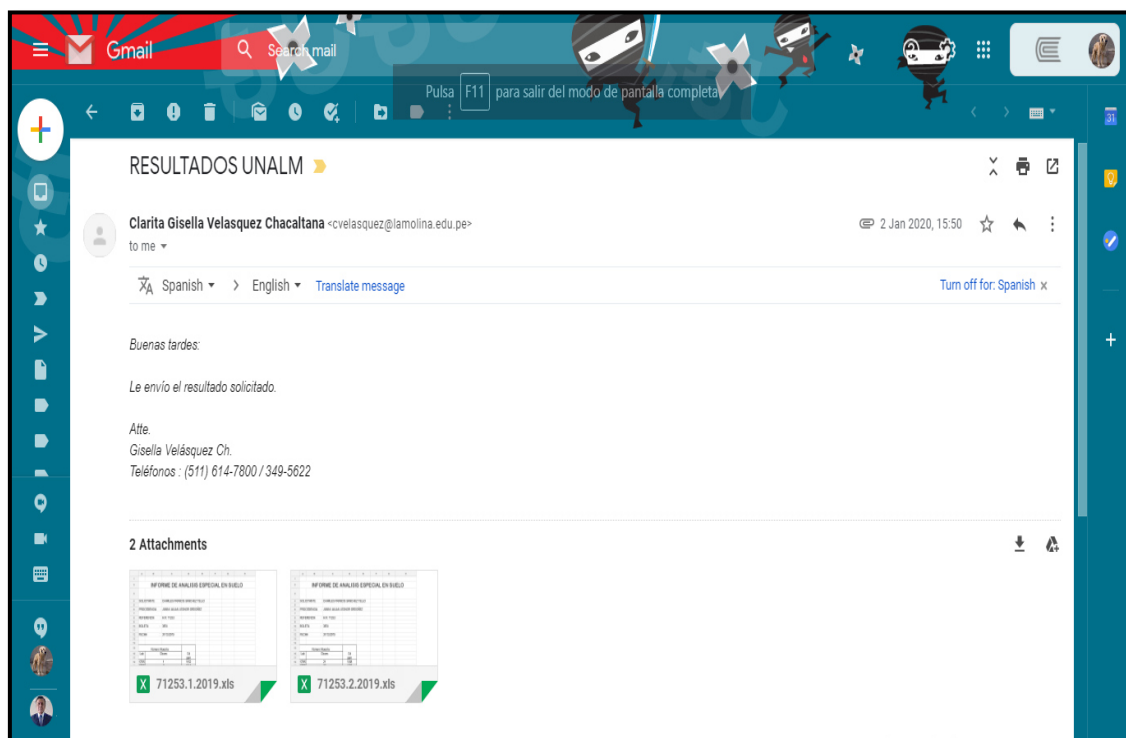
INFORME DE ANÁLISIS ESPECIAL EN SUELO UNALM

SOLICITANTE : CHARLES FRANCIS SANCHEZ TELLO
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ LEONOR ORDOÑEZ
REFERENCIA : H.R. 71253
BOLETA : 3874
FECHA : 31/12/2019

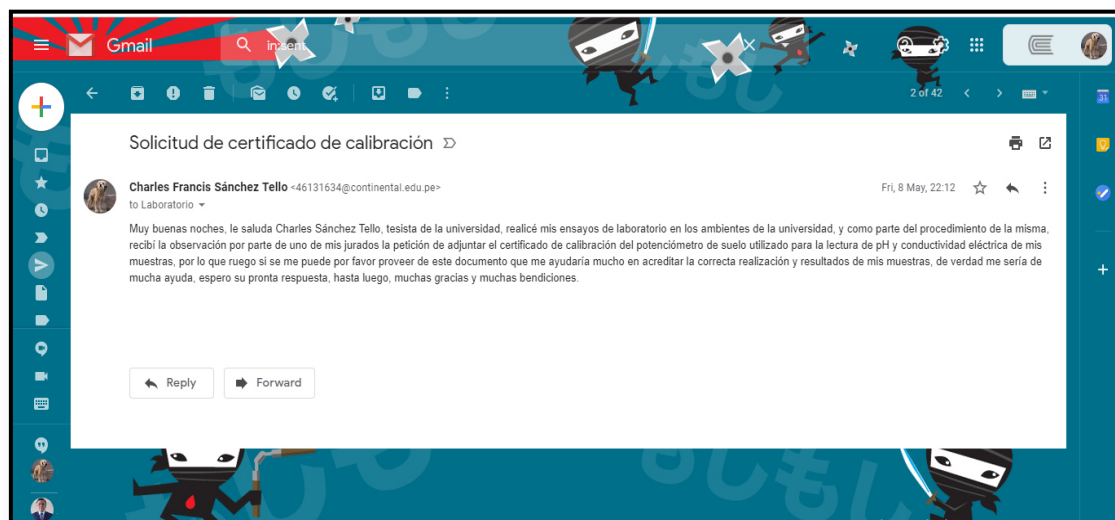
Número Muestra		Cd
Lab	Claves	ppm
5765	1	9.52
5766	2	9.11
5767	3	29.91
5768	4	10.10
5769	5	4.95
5770	6	7.12
5771	7	5.61
5772	8	4.26
5773	9	4.56
5774	10	10.87
5775	11	5.90
5776	12	3.43
5777	13	11.16
5778	14	19.08
5779	15	3.92
5780	16	3.93
5781	17	2.30
5782	18	2.62
5783	19	2.49
5784	20	4.48
5785	21	5.68
5786	22	2.65
5787	23	5.01
5788	24	21.33
5789	25	11.49
5790	26	7.01
5791	27	8.44
5792	28	5.50
5793	29	5.61
5794	30	1.88
5795	31	3.73
5796	32	4.99
5797	33	2.72
5798	34	3.86
5799	35	6.46
5800	36	4.99
5801	37	9.36
5802	38	29.32
5803	39	8.17
5804	40	13.63

Ing. Braulio La Torre Martínez
Jefe del Laboratorio

Anexo 7. Correo recibido por parte de la UNALM, en la que se adjunta los resultados de análisis de cadmio



Anexo 8. Correo dirigido al laboratorio de química y biología solicitando certificado de calibración del pHmetro



Anexo 9. Galería fotográfica



Fotografía 1: Toma de una muestra superficial



Fotografía 2: Muestras totales, aproximadamente 40 kg en total



Fotografía 3: Tamizado de las muestras con tamiz de 2 mm



Fotografía 4: Determinación de la textura por el método de Bouyoucos



Fotografía 5: Determinación de la densidad y porosidad por el método de la probeta



Fotografía 6: Determinación de la capacidad de campo del suelo de forma gravimétrica



Fotografía 7: Secado de muestra a 105° en el horno de secado



Fotografía 8: Potenciómetro de suelo utilizado para la lectura del pH y conductividad eléctrica



Fotografía 9: Titulación con versenato como parte de la determinación de la capacidad de intercambio catiónico



Fotografía 10: Determinación del carbono orgánico por el método Walkley-Black



Fotografía 11: Agitadores magnéticos usados para la mezcla automática



Fotografía 12: Espectrofotómetro usado dentro del proceso de determinación de fósforo y potasio