

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**RELACIÓN ENTRE METALES TRAZA EN CULTIVOS AGRÍCOLAS Y
SUELOS CONTAMINADOS POR AGROQUÍMICOS EN EL CASERÍO VILLA
RICA – LEONCIO PRADO, 2023**

Tesis

**Para obtener título de
INGENIERO AMBIENTAL**

**Presentado por
ROLIN AQUINO BRAVO**

Tingo María - Perú

2024



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 116-2024-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 13 de diciembre de 2024, a horas 10:00. am. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“RELACIÓN ENTRE METALES TRAZA EN CULTIVOS AGRÍCOLAS Y SUELOS CONTAMINADOS POR AGROQUÍMICOS EN EL CASERÍO VILLA RICA – LEONCIO PRADO, 2023”

Presentado por el Bachiller: **ROLIN AQUINO BRAVO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 18 de diciembre de 2024


Dr. JOSÉ D. LÉVANO CRISÓSTOMO
PRESIDENTE


Ing. MSc. SANDRA L. ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO


Ing. MSc. ANGIE T. FERNÁNDEZ ESCOBAR
MIEMBRO




Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO
ASESOR



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 373 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniero Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
RELACIÓN ENTRE METALES TRAZA EN CULTIVOS AGRÍCOLAS Y SUELOS CONTAMINADOS POR AGROQUÍMICOS EN EL CASERÍO VILLA RICA – LEONCIO PRADO, 2023	ROLIN AQUINO BRAVO	15 % Quince

Tingo María, 27 de diciembre de 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Maltqui

VEFE

C.C. Archivo

VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
OFICINA DE INVESTIGACION



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE
Y TESISISTA

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos Generales de Pregrado

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva.
Facultad : Facultad de Recursos Naturales Renovables.
Título de tesis : Relación entre metales traza en cultivos agrícolas y suelos contaminados por agroquímicos en el Caserío Villa Rica – Leoncio Prado, 2023.
Autor : Aquino Bravo Rolin.
Asesor de tesis : Dr. Luis Eduardo Oré Cierto.
Escuela Profesional : Ingeniería Ambiental.
Programa de investigación : Gestión Ambiental.
Línea(s) de investigación : Sistema de gestión.
Eje Temático : Gestión de suelos contaminado y degradado.
Lugar de ejecución : Caserío Villa Rica.
Duración : Inicio : Octubre 2023
Término : Octubre 2024
Financiamiento : FEDU : S/0.00
Propio : S/23,316.83
Otros : S/0.00

Tingo María, Perú, diciembre 2024.

A blue ink signature of Rolin Aquino Bravo.

Rolin Aquino Bravo

Tesista

A blue ink signature of Luis Eduardo Oré Cierto.

Luis Eduardo Oré Cierto

Asesor

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada momento de este viaje. Su infinita sabiduría y amor me han permitido superar los desafíos y seguir adelante. Este éxito es un reflejo de Su presencia en mi vida, ya Él le agradezco por darme la oportunidad.

A mis padres, Félix Aquino Retis y Luci Bravo Adrian, quienes siempre han sido mi mayor apoyo y fuente de inspiración. Su amor incondicional, enseñanzas y sacrificio me han permitido crecer y llegar hasta aquí. Este logro es tan suyo como mío, ya que, sin ellos, nada de esto habría sido posible.

A mis hermanos, por su constante respaldo y por estar a mi lado en todo momento. Su apoyo, amor y palabras de aliento han sido cruciales para alcanzar este éxito. Este logro también es de ustedes, por ser parte fundamental de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero *expresar* mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta investigación. Este proyecto ha sido un viaje lleno de aprendizaje y descubrimientos, y no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas.

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Agraria de la Selva por brindarme una formación académica de calidad, que ha sido fundamental para mi desarrollo profesional. Esta institución ha sido el pilar de mi crecimiento y aprendizaje, proporcionándome las herramientas necesarias para enfrentar los retos que se presentaron durante esta investigación.

A mi asesor, Dr. ORE CIERTO, Luis Eduardo, le agradezco por su apoyo incondicional, su guía experta y por siempre estar dispuesto a compartir su conocimiento. Su dedicación y compromiso han sido esenciales para el desarrollo de este trabajo, y su orientación me ha permitido alcanzar este logro.

A mis amigos Joseph Robles Aira y José Flores Tapullima, les agradezco enormemente por su colaboración en la ejecución y redacción de este proyecto. Su ayuda fue crucial para llevar a cabo esta investigación de manera exitosa, y su amistad ha sido un apoyo constante en todo momento.

A mis jurados, agradezco por su tiempo, esfuerzo y valiosas observaciones durante el proceso de evaluación. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido este trabajo, permitiéndome mejorar y alcanzar los estándares que se esperaban.

Muchas gracias y que Dios les bendiga.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivo	3
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Antecedentes.....	4
2.2.	Marco, teórico.....	8
2.2.1.	Metales traza.....	8
2.2.2.	Parámetro fisicoquímico del suelo degradado	15
2.3.	Marco conceptual.....	30
2.3.1.	Uso intensivo de, herbicidas	30
2.3.2.	Herbicidas	31
2.3.3.	Categoría toxicológica	33
2.3.4.	Formulación química de los herbicidas	34
2.3.5.	Estándar de calidad Ambiental para suelo	38
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1.	Lugar de ejecución.....	40
1.1.1.	Ubicación política de la, zona de, estudio.....	40
1.1.2.	Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	40
3.2.	Materiales y equipos	41
3.3.	Criterios de investigación	41
3.3.1.	Nivel de investigación	41
3.3.2.	Tipo de investigación.....	41
3.3.3.	Método de investigación.....	42
3.3.4.	Operacionalización de variables	42
3.3.5.	Diseño de investigación.....	44
3.3.6.	Población y muestra.....	44

3.3.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	45
3.3.8.	Análisis de datos	45
3.4.	Metodología.....	46
3.4.1.	Identificación del área de estudio	46
3.4.2.	Recolección de las muestra y aplicación del tratamiento.	46
3.4.3.	Análisis de parámetros fisicoquímicos del suelo	47
3.4.4.	Determinación de las concentraciones, de metales traza (Cadmio, Manganeso, Plomo, Cobre, y Zinc).....	47
3.4.5.	La relación entre el uso de herbicidas y los metales traza Cadmio, Manganeso, Plomo, Cobre, y Zinc en suelos del cultivo del <i>Teobroma cacao L</i>	48
3.4.6.	Evaluación del cumplimiento con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas.	48
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1.	La relación entre el uso de herbicidas y los parámetros físicos en suelos del cultivo del <i>Teobroma cacao L</i>	49
4.2.	La relación entre el uso de herbicidas y los parámetros químicos en suelos del cultivo del <i>Teobroma cacao L</i>	56
4.3.	La relación entre el uso de herbicidas y los metales traza Cadmio, Manganeso, Plomo, Cobre, y Zinc en suelos del cultivo del <i>Teobroma cacao L</i>	79
4.4.	Cumplimiento con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas	93
V.	CONCLUSIONES.....	97
VI.	PROPUESTA A FUTURO.....	98
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
VIII.	ANEXO	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo	39
2. Operacionalización de variables.	42
3. Los ECA para suelos agrícolas	48
4. Comparación de Cd y Pb con el ECA para suelo agrícola.	93
5. Comparación del porcentaje de Arena.	105
6. Resultados de arcilla.	105
7. Resultados de limo	105
8. Resultados de conductividad eléctrica.	106
9. Resultados de PH.	106
10. Resultados de Materia orgánica	106
11. Resultados de Nitrógeno.	107
12. Resultados de Carbono.	107
13. Resultados de Fosforo.....	107
14. Resultados de Oxido de potasio.	108
15. Resultados de Hierro.	108
16. Resultados de Zinc.....	108
17. Resultados de Manganeso.....	109
18. Resultados de Cobre.	109
19. Resultados de Cadmio.....	109
20. Resultados de plomo.	110
21. Resultados de calcio.....	110
22. Resultados de Magnesio.	110
23. Resultados de potasio.....	111
24. Resultados de Sodio.....	111
25. Resultados de Aluminio	111
26. Resultados de Hidrogeno.	112
27. Resultados de Cl Ce.....	112
28. Resultados de Bases Cambiables.	112
29. Resultados de Acidez Cambiables.	113
30. Resultados de Saturación de Aluminio	113
31. Prueba de normalidad.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama triangular de las clases texturales.....	17
2. Composición química de los herbicidas Finoxiacéticos.....	35
3. Composición química de los herbicidas Triazínicos.....	35
4. Composición química de los herbicidas Bipiridílicos.....	36
5. Composición química de los herbicidas Glifosatos.....	36
6. Composición química de los herbicidas Propanilos.....	37
7. Composición química de los herbicidas derivados de la Urea.....	37
8. Composición química de otros herbicidas.....	38
9. Ubicación, política, de la zona, de estudio.....	40
10. Diseño cuasi experimental de la investigación.....	44
11. Parcelas del estudio.....	46
12. Comparación inicial y final de resultado del porcentaje de arena.....	49
13. Comparación inicial y final de resultado de porcentaje de arcilla.....	51
14. Comparación inicial y final de resultado del porcentaje limo.....	52
15. Comparación inicial y final de resultado de conductividad eléctrica.....	54
16. Comparación inicial y final de resultado de PH.....	56
17. Comparación inicial y final de resultado de Materia orgánica.....	57
18. Comparación inicial y final de resultado de Nitrógeno.....	58
19. Comparación inicial y final de resultado de carbono.....	59
20. Comparación inicial y final de resultado de Fosforo.....	61
21. Comparación inicial y final de resultado de Oxido de potasio.....	62
22. Comparación inicial y final de resultado de Hierro.....	63

23. Comparación inicial y final de resultado de calcio	65
24. Comparación inicial y final de resultado de Magnesio.....	66
25. Comparación inicial y final de resultado de potasio.....	67
26. Comparación inicial y final de resultado de Sodio.	69
27. Comparación inicial y final de resultado de aluminio.	70
28. Comparación inicial y final de resultado de Hidrogeno.	71
29. Comparación inicial y final de resultado de Cl Ce.	73
30. Comparación inicial y final de resultado de Bases Cambiables.	74
31. Comparación inicial y final de resultado de Acidez Cambiables.	76
32. Comparación inicial y final de resultado de Saturación de Aluminio.	77
33. Comparación inicial y final de resultado de Zinc.	79
34. Comparación inicial y final de resultado de Manganeso.	80
35. Comparación inicial y final de resultado de cobre.....	81
36. Comparación inicial y final de resultado de Cadmio.....	83
37. Comparación inicial y final de resultado de plomo.	84
38. Observaciones del análisis de componentes principales (PCA), para las muestras iniciales y finales.....	85
39. Análisis de componentes principales (PCA) basado en los parámetros y metales (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) general para la comparación de las muestras antes y después del tratamiento.	87
40. Análisis de componentes principales (PCA) basado en los parámetros y metales (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) general para la comparación de las muestras antes del tratamiento.	89
41. Análisis de componentes principales (PCA) basado en los parámetros y metales (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) general para la comparación de las muestras después del tratamiento.	91
Resultados del análisis de los parámetros y metales de las muestras del suelo en el Laboratorio de Análisis de suelo, Agua y ecotoxicología.	104

43. Visita al caserío Villa Rica.	115
44. Visita a las parcelas de Teobroma cacao L.	115
45. Extracción de la muestra antes de la aplicación de la herbicida.	116
46. Recojo, de la muestra, en la parcela 1.	116
47. Recojo de la muestra, en la parcela 2.	117
48. Recojo de la muestra en la parcela3.	117
49. Las muestras del antes del tratamiento con herbicidas.	118
50. Parcela antes de la aplicación de la herbicida.	118
51. Aplicación de herbicidas en las parcelas.	119
52. Parcela después de la aplicación de la herbicida.	119
53. Recojo de las muestras después de la aplicación del herbicida.	120
54. Muestras recolectadas después del tratamiento con herbicidas.	120

RESUMEN

La investigación evaluó la relación entre el uso de herbicidas (Itasato, Devastor e Iguana) y la dinámica de metales traza en suelos agrícolas dedicados al cultivo de *Theobroma cacao L.* en el caserío Villa Rica, Perú. Mediante un diseño cuasi experimental de tipo relacional, se analizaron parámetros físicos (textura, densidad aparente), químicos (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico) y concentraciones de metales traza (Cd, Pb, Zn, Mn y Cu) en suelos antes y después de la aplicación de herbicidas. Los resultados mostraron que los herbicidas influyen en la química del suelo, con disminuciones en el pH y aumentos en la conductividad eléctrica, destacando un mayor efecto en suelos tratados con Iguana. El cadmio mostró reducciones significativas (0.072 ppm con Itasato, 0.032 ppm con Devastor y 0.012 ppm con Iguana), mientras que el plomo se mantuvo entre 2.812 y 4.408 ppm, cumpliendo los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas. Estos resultados concuerdan con estudios previos que vinculan el pH y la conductividad eléctrica con la movilidad de metales traza. Aunque los niveles de metales no representan riesgos ambientales significativos, el uso de herbicidas modifica las propiedades del suelo, lo que podría impactar la sostenibilidad agrícola a largo plazo. Se concluye que los herbicidas afectan los parámetros fisicoquímicos y la dinámica de los metales en suelos de cacao, recomendándose un monitoreo continuo y estudios a largo plazo para evaluar sus efectos acumulativos y garantizar una gestión sostenible del cultivo en la región amazónica.

Palabras Clave: Herbicida, Metal traza, Suelo Agrícola.

ABSTRACT

[In] the research the relationship between the herbicides (Itasato, Devastor and Iguana) and the dynamics of trace metals in the agricultural soil dedicated to the *Theobroma cacao L.* crop on the Villa Rica homestead in Perú, was evaluated. Through a quasi-experimental design of a relational type the physical (texture [and] apparent density), chemical (pH, electrical conductivity, organic matter [and] cation exchange capacity) and trace metal concentration (Cd, Pb, Zn, Mn, and Cu) properties in the soil were analyzed before and after the application of herbicides. The results revealed that the herbicides influenced the chemistry of the soil, with decreases in the pH and increases in the electrical conductivity, highlighting a greater effect on soil treated with Iguana. There were significant reductions for the cadmium (0.072 ppm with Itasato, 0.032 ppm with Devastor and 0.012 ppm with Iguana); meanwhile, for the lead, it was steady between the 2.812 and 4.408 ppm, complying with environmental quality standards (EQA; ECA in Spanish) for agricultural soil. These results are in agreement with previous studies that link the pH and the electrical conductivity to the mobility of trace metals. Even though the levels of metals did not represent a significant environmental risk, the use of herbicides modified the properties of the soil, which could impact the agricultural sustainability in the long term. It was concluded that the herbicides affected the physicochemical parameters and the dynamic of the metals in the soil for cacao; [it is] recommended that continuous monitoring and studies be done in the long term in order to evaluate the accumulative effects and guarantee a sustainable management of the crop in the Amazon region.

Keywords: herbicide, trace metal, agricultural soil.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos agrícolas debido al uso intensivo de agroquímicos representa un desafío ambiental, económico y social de creciente preocupación, particularmente en regiones cuya economía depende en gran medida de la actividad agrícola. Este fenómeno pone en riesgo no solo la salud del ecosistema y la calidad de los cultivos, sino también la seguridad alimentaria y los medios de vida de las comunidades rurales. En el caserío Villa Rica, situado en el distrito de Leoncio Prado, la actividad agrícola constituye la columna vertebral de la economía local, con el cacao (*Theobroma cacao*) como cultivo emblemático y de mayor relevancia económica. Este producto, reconocido por su calidad en los mercados regionales e internacionales, es una fuente vital de ingresos para los agricultores de la zona. Sin embargo, el cacao no es el único cultivo desarrollado en esta área; También se producen otros cultivos propios de la región amazónica, como plátano, yuca, maíz y una variedad de frutales. Estos productos, además de diversificar la producción, son esenciales para la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de la población local.

La creciente demanda de producción agrícola ha llevado a una intensificación en el uso de agroquímicos, particularmente herbicidas, para controlar la vegetación no deseada y maximizar los rendimientos. No obstante, esta práctica puede tener efectos negativos importantes, especialmente en los suelos agrícolas. La aplicación frecuente y prolongada de herbicidas como Itasato, Devastor e Iguana puede alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, afectando su fertilidad y salud a largo plazo. Además, estos productos químicos tienen el potencial de introducir metales traza al suelo o modificar la disponibilidad de los mismos, generando riesgos tanto para el ecosistema como para la salud humana.

Los metales traza, tales como zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb), son elementos naturales presentes en el suelo en concentraciones bajas y desempeñan funciones esenciales en el desarrollo de las plantas. Sin embargo, cuando sus niveles exceden los límites naturales, pueden volverse tóxicos, afectando tanto a los cultivos como al medio ambiente y, en última instancia, al consumidor final. Por ejemplo, mientras el Zn, Mn y Cu son necesarios en cantidades pequeñas para el crecimiento vegetal,

el Cd y el Pb son altamente tóxicos incluso en concentraciones mínimas, representando un riesgo significativo para la salud pública y los ecosistemas.

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito analizar la relación entre los niveles de metales traza en los suelos agrícolas del caserío Villa Rica y el impacto generado por la aplicación de herbicidas específicos como Itasato, Devastor e Iguana. El estudio se enfocará en la evaluación de parámetros clave del suelo, incluyendo el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica y las concentraciones disponibles de Zn, Mn, Cu, Cd y Pb, tanto antes como después de la aplicación de estos herbicidas. Este enfoque permitirá identificar alteraciones en la calidad del suelo, así como su capacidad para soportar cultivos a largo plazo, con especial énfasis en el cacao como cultivo principal de la zona.

La selección de los herbicidas Itasato, Devastor e Iguana no es casual, ya que su uso intensivo en la región responde a la necesidad de controlar especies vegetales invasoras que compiten por recursos limitados. Sin embargo, las implicancias químicas de estos productos en la dinámica del suelo son motivo de preocupación. El análisis comparativo antes y después de su aplicación permitirá determinar de manera precisa el impacto de estas sustancias en la disponibilidad y acumulación de metales traza, así como su posible transferencia a los cultivos agrícolas, contribuyendo a una comprensión más completa de los riesgos asociados.

Esta investigación no solo busca generar datos valiosos sobre la interacción entre los herbicidas y los metales traza en los suelos agrícolas amazónicos, sino también identificar prácticas de manejo agrícola más sostenibles. Esto incluye alternativas para mitigar la contaminación del suelo y mejorar la calidad de los cultivos, garantizando una producción más segura y eficiente. Los resultados obtenidos serán de gran utilidad para los agricultores locales, quienes podrán implementar estrategias más amigables con el medio ambiente y mejorar la calidad de sus productos agrícolas. Asimismo, servirán como insumo para diseñar políticas públicas orientadas al uso racional de agroquímicos en la región amazónica.

En definitiva, esta investigación representa un aporte significativo al conocimiento sobre el impacto del uso de herbicidas en la calidad del suelo y la dinámica de metales traza en contextos agrícolas amazónicos. Al abordar estas problemáticas, se busca promover prácticas agrícolas sostenibles que beneficien tanto a la población local como al medio

ambiente, asegurando la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo de la agricultura en el caserío Villa Rica, teniendo esta ¿Hay relación entre metales traza en cultivos agrícolas y suelos contaminados por agroquímicos en el caserío Villa Rica – Leoncio Prado, 2023?

1.1. Objetivo

Determinar la relación entre metales traza en cultivos agrícolas y suelos contaminados por agroquímicos en el caserío Villa Rica – Leoncio Prado, 2023

1.1.1. Objetivos específicos

- Determinar la relación entre el uso de herbicidas y los parámetros físicos en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L.*
- Determinar la relación entre el uso de herbicidas y los parámetros químicos en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L.*
- Determinar la relación entre el uso de herbicidas y los metales traza Cadmio, Manganeso, Plomo, Cobre, y Zinc en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L.*
- Evaluar su cumplimiento con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes

Según Mendoza et al. (2021) nos menciona que en su trabajo, se señaló que la implementación de la siembra directa ocasionó incrementos notables en las concentraciones de elementos como cobalto (Co), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd) y zinc (Zn). Este fenómeno fue atribuido al uso prolongado de fertilizantes fosfatados. Además, se observó una mayor acumulación en la capa freática inferior, vinculada a la presencia de suelos arcillosos y a la capacidad de intercambio catiónico. Es crucial resaltar que los niveles de cobalto (Co), cobre (Cu) y cadmio (Cd) superaron los límites establecidos a la normativa.

En la investigación de Huamaní, (2012), Se realizó un estudio para evaluar los niveles de cadmio y plomo en suelos y hojas de cacao. Como parte de la investigación, se llevaron a cabo análisis de correlación de Pearson con el objetivo de explorar la relación entre los niveles de plomo y cadmio en el suelo y varias variables foliares (P, Mg, Ca, Zn, Cd, Pb) y del suelo (arena, arcilla y K). Los resultados revelaron que los valores promedio de cadmio en los suelos fueron de 0.53 ppm, mientras que para el plomo fueron de 3.02 ppm. Por otro lado, en las hojas de cacao, los valores promedio de cadmio y plomo fueron de 0.21 y 0.58 ppm, respectivamente. Este análisis de correlación proporciona información valiosa sobre la posible interacción entre los niveles de cadmio y plomo en el suelo y las diferentes variables tanto foliares como del suelo. La comprensión de estas relaciones puede ser fundamental para abordar y gestionar la contaminación por metales pesados en cultivos de cacao, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y la calidad de los productos agrícolas., respectivamente. Estos resultados ofrecen una perspectiva detallada de la presencia de metales pesados en suelos y tejidos foliares de cultivos orgánicos de cacao en esas áreas específicas.

Según la investigación de Solorzano et al. (2015) se desarrolló en 14 parcelas destinadas a Se llevó a cabo un estudio exhaustivo en las zonas de producción de cacao, localizadas en el Distrito de San Alejandro, el Caserío Mar del Plata Km 72 interior 12 y el Caserío Hermosa Selva Km 50 interior 15. Estas áreas se encuentran ubicadas en las provincias de Padre Abad y Coronel Portillo, en la Región Ucayali. El objetivo primordial

de esta investigación fue analizar en detalle los niveles de plomo (Pb) y cadmio (Cd) presentes en los suelos de estas parcelas. La investigación se orientó hacia un enfoque relacional, de diseño cuasi experimental. Se procedió a la recopilación de muestras de suelo a una profundidad de 30 centímetros en las 14 parcelas donde se llevó a cabo el experimento. Esta metodología permitió obtener datos representativos de la presencia y concentración de plomo y cadmio en los suelos de las áreas de cultivo de cacao en cuestión. La elección de estas ubicaciones estratégicas en las provincias de Padre Abad y Coronel Portillo busca proporcionar una visión integral de la calidad del suelo en regiones clave para la producción de cacao. Los resultados de este estudio no solo contribuirán a la comprensión de la salud del suelo en estas áreas, sino que también serán fundamentales para abordar posibles preocupaciones relacionadas con la presencia de metales pesados en entornos agrícolas. Este enfoque analítico riguroso sienta las bases para futuras estrategias de gestión ambiental y agrícola en la región. Los resultados indicaron que el contenido de plomo en los suelos de todas las parcelas evaluadas no supera el límite permitido de 70 ppm, siendo el promedio más alto registrado de 5 ppm. En cuanto al contenido de cadmio, ninguna de las parcelas evaluadas excedió los límites permitidos de 1.4 ppm. Estos hallazgos indican que, según los estándares aplicados, los suelos de las parcelas estudiadas en la Región Ucayali no presentan concentraciones preocupantes de plomo ni cadmio. Es importante destacar que la investigación adoptó un enfoque relacional, proporcionando una instantánea detallada de la situación de la variable manipulada del diseño cuasi experimental donde se toma muestras antes y después de la manipulación de la variable.

Según Viera & Anteparra, (2019) Teniendo como resultado de su investigación el estudio se enfocó en evaluar el impacto de e llevó a cabo un estudio detallado en Tingo María, enfocado en la evaluación de tres herbicidas totales con diferentes modos de acción y dosis, aplicados en las malezas que afectan a *Teobroma cacao* L. Después de un tiempo, desde la aplicación de los tratamientos, se pudieron identificar diferencias estadísticamente significativas entre ellos, destacándose un rango de control promedio que experimentó variaciones notables, oscilando desde el 85.50% hasta el 40.75%. Durante este período, el T7 (Paraquat 4 L/ha-1) logró el mayor control, mientras que el T2 (Glifosato 2 L/ha-1) mostró el porcentaje más bajo. A los 30 días, persistieron las diferencias estadísticas, y el control promedio varió entre el 92.50% y el 65.00%. Nuevamente, el T7 (Paraquat 4 L/ha-1) lideró en eficacia, y el T3 (Gramocil 2 L/ha-1) ocupó la última posición. A los 45 días, las diferencias estadísticas continuaron, y el control promedio varió entre el 96.00% y el

89.50%. El tratamiento más efectivo en este período fue el T4 (Paraquat 3 L/ha-1), con un control del 96%, seguido por el T7 (Paraquat 4 L/ha-1) con un 95.5%. En contraste, el T2 (Glifosato 2 L/ha-1) mostró el menor efecto de control, registrando un 89.75%. En términos de control, se destaca que el tratamiento T4 (Paraquat 3 L/ha-1) demostró un efecto significativo, logrando el mayor porcentaje de control a una dosis media de 3 L/ha-1. Por otro lado, el tratamiento T7 (Paraquat 4 L/ha-1) también mostró una efectividad considerable a una dosis media de 4 L/ha-1. En contraste, el tratamiento T2 (Glifosato 2 L/ha-1) exhibió un efecto de control más bajo, registrado en un 89.75% a los 45 días. La investigación se centró en analizar la eficacia de los herbicidas seleccionados, cada uno con su propio mecanismo de acción y niveles específicos de dosificación, en el control de malezas que afectan directamente el cultivo de cacao. Estos herbicidas totales fueron cuidadosamente seleccionados para abordar la diversidad de malezas presentes en la zona de Tingo María. La observación realizada a los 15 días posteriores a la aplicación reveló resultados significativos, indicando que ciertos tratamientos tuvieron un impacto más efectivo en el control de malezas en comparación con otros. La variabilidad en el rango de control promedio resalta la importancia de elegir estratégicamente herbicidas que se alineen adecuadamente con las características específicas del entorno y las especies de malezas presentes. Estos hallazgos no solo proporcionan información valiosa para la gestión eficiente de malezas en los cultivos de cacao en Tingo María, sino que también sirven como base para futuras investigaciones y prácticas agrícolas en la región. La comprensión de las diferencias en la respuesta de las malezas a diferentes herbicidas contribuye al desarrollo de estrategias más efectivas y sostenibles para la protección de los cultivos de cacao.

Según Defargea et al, (2018) los herbicidas a base de glifosato (GBH) son considerados como los principales pesticidas a nivel mundial, generando un extenso debate en torno a su toxicidad. Este estudio se enfocó en comprender los efectos herbicidas y toxicológicos comparativos del glifosato (G) en solitario y de 14 formulaciones que sirven como modelo para pesticidas. Los GBH se presentan como mezclas de agua, con el principio activo que normalmente oscila entre el 36% y el 48% de G. Al igual que otros pesticidas, entre el 10% y el 20% de los GBH consisten en formulaciones químicas. Mediante espectrometría de masas, identificamos previamente que estas formulaciones están compuestas principalmente por familias de moléculas oxidadas derivadas del petróleo, como el éster polioxi-etileno de alquilfosfonato (POEA), y otros contaminantes.

Además, a través de la espectrometría de masas, identificamos la presencia de metales pesados como arsénico, cromo, cobalto, plomo y níquel en estos pesticidas, los cuales son conocidos por su toxicidad y su capacidad para actuar como disruptores endocrinos. Estos contaminantes se encontraron en 22 pesticidas, incluyendo 11 basados en glifosato. Esta presencia de metales pesados y disruptores endocrinos podría explicar algunos de los efectos adversos asociados con el uso de estos pesticidas.

Calderón & Rozo, (2012) en su investigación consistió en examinar la movilización del cadmio y plomo en diversos componentes, como suelos, hojas, frutos y lixiviados, en plantaciones de cacao en América Latina durante el período comprendido entre 2018 y 2023. Para llevar a cabo esta evaluación, se realizó la identificación, caracterización y recopilación de información procedente de diversas fuentes, como Scopus, SpringerLink, Elsevier, Google Académico, Sciencedirect y Web of Science. Estos recursos fueron combinados con tesauros, filtros, palabras clave y lenguaje booleano para optimizar el proceso de búsqueda. Como resultado de este procedimiento, se seleccionaron en total 12 artículos, de los cuales se extrajeron las metodologías, instrumentos y resultados relevantes. La conclusión principal obtenida de esta revisión apunta hacia una creciente inquietud por la presencia de cadmio y plomo en las plantaciones de cacao. Se destaca, además, la implementación de límites en el territorio colombiano y la urgencia de aumentar la inversión en investigación y monitoreo para contrarrestar la contaminación por estos metales en el cacao. Este estudio subraya la importancia de comprender y abordar los riesgos asociados con la presencia de metales pesados en las plantaciones de cacao en la región. En resumen, la investigación pone de manifiesto la necesidad de medidas preventivas y estrategias de gestión para garantizar la calidad y seguridad de los cultivos de cacao en América Latina.

En esta investigación realizado por Cordova & Farfan, (2022), se llevó a cabo la cuantificación del contenido de cadmio (Cd) en suelo, hojas y almendras de *Teobroma cacao* L. en dos plantaciones de la provincia de "El Oro". El objetivo principal era establecer relaciones entre los resultados obtenidos y los límites máximos establecidos por el reglamento 2021/1323 de la Unión Europea para almendras de cacao, así como el libro VI del TULSMA para las concentraciones en el suelo. Las muestras se recolectaron de manera aleatoria en distintos puntos de ambas plantaciones, generando posteriormente muestras compuestas para cada tipo (suelo, hojas, almendras), resultando en 3 muestras distintas por ubicación de estudio. Después de un pretratamiento que incluyó el secado y

la trituración de cada muestra, estas se prepararon para el análisis de laboratorio. Los resultados revelaron valores de 0,18 ppm en suelo, 1,34 ppm en hojas y 0,55 ppm en almendras para la finca "San Antonio". Además, se observó un pH ácido de 5,51, sugiriendo la posibilidad de bioacumulación del metal pesado en este entorno. Por otro lado, la finca "Mi Chinita" mostró valores de 0,7 ppm en suelo, 2 ppm en hojas y 1,27 ppm en almendras, junto con un pH ácido de 4,8, indicando un posible problema de bioacumulación similar al encontrado en la finca anterior. Estos resultados señalan la presencia de niveles significativos de cadmio en suelo, hojas y almendras de cacao en ambas plantaciones, lo que podría tener implicaciones importantes para la seguridad alimentaria y la conformidad con los estándares regulatorios establecidos. La detección de pH ácido en ambos lugares resalta la preocupación por la posible bioacumulación del metal pesado en el sistema. En consecuencia, estos hallazgos sugieren la necesidad de medidas y estrategias para mitigar la presencia de cadmio y evitar riesgos para la salud y el medio ambiente.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Metales traza

Los metales traza son elementos que se encuentran en el ambiente en concentraciones relativamente bajas, generalmente inferiores a mil partes por millón. Algunos de estos elementos desempeñan funciones esenciales en el ciclo de vida de diversos organismos y se les denomina micronutrientes. Estos metales, aunque presentes en cantidades mínimas, cumplen roles críticos en procesos biológicos clave. Entre ellos se encuentran minerales esenciales como el hierro, zinc, cobre y manganeso, los cuales son fundamentales para funciones vitales en plantas, animales y microorganismos. La importancia de estos micronutrientes radica en su participación en procesos metabólicos esenciales, tales como la fotosíntesis, la formación de enzimas y la transferencia de electrones. A pesar de su presencia en concentraciones bajas, la carencia de estos elementos puede tener impactos significativos en la salud y desarrollo de organismos vivos. La comprensión de la función de los metales traza como micronutrientes es crucial tanto en la investigación ambiental como en la agricultura, ya que influyen directamente en la productividad de los cultivos y en la salud de los ecosistemas. En este sentido, el estudio detallado de las interacciones entre estos elementos y los organismos vivos contribuye a un manejo más efectivo y sostenible de los recursos naturales.; por otro lado, existen metales traza que carecen de un papel biológico y, en cambio, son tóxicos; la evaluación y

determinación de estos metales son fundamentales como parte de las estrategias destinadas a preservar la salud y calidad de los suelos agrícolas; de esta manera, se busca mantener un equilibrio adecuado para el desarrollo de los seres vivos y prevenir posibles impactos negativos en el entorno agrícola (Veda, 2021).

En los suelos pueden los metales traza ser categorizados en cinco grupos, clasificados según su forma química. Es relevante destacar que estas categorías no son mutuamente excluyentes, ya que algunos elementos pueden presentarse en más de una forma (Galán, 2008). En términos de concentraciones, generalmente, los elementos como Cr, Ni, Pb y Zn exhiben variaciones en el rango de 1 a 1500 mg kg⁻¹, mientras que Co, Cu y As se encuentran en el intervalo de 0.1 a 250 mg kg⁻¹. Por otro lado, elementos como Cd y Hg se presentan en proporciones más bajas, oscilando entre 0.01 y 2 mg kg⁻¹. Estos valores, proporcionan una referencia de las concentraciones típicas, de estos elementos traza en los suelos, lo que es crucial para entender y monitorear la salud y calidad del suelo, así como para evaluar posibles riesgos ambientales (Galán, 2008). Esta investigación aborda la clasificación de elementos traza en suelos según su forma química. Establece cinco categorías y subraya la posibilidad de que algunos elementos se presenten en más de una forma. Asimismo, proporciona rangos típicos de concentraciones para diferentes elementos traza en el suelo. Este enfoque facilita la comprensión de la diversidad de formas y concentraciones en las que estos elementos pueden estar presentes en los suelos.

2.2.1.1. Metales traza en suelos degradados

La tierra es un recurso muy importante en esta sociedad, sin embargo, es también uno de los más afectados por la degradación y una gestión inadecuada (General, 2015).

La presencia de metales traza en el suelo se ve afectada de manera considerable debido a procesos de degradación que impactan negativamente en sus propiedades; la recuperación de suelos degradados se interpreta como la restauración de sus funciones biológicas, físicas y químicas fundamentales; en esencia, implica restituir las características esenciales del suelo para que pueda cumplir adecuadamente con sus roles biológicos, físicos y químicos. Este proceso es crucial para garantizar la salud y la productividad del suelo, así como para mantener la sostenibilidad de los ecosistemas asociados (Porta, 2003).

La contemporánea ha generado cambios significativos en el medio ambiente, y diversas labores como la construcción, la industria y la agropecuaria ejercen presión sobre prácticamente todos los ecosistemas, ya sea de manera directa o indirecta, afectando al aire, agua y suelo. En este contexto, es crucial que los organismos pertinentes proporcionen a las autoridades correspondientes (a nivel estatal, regional y local) información precisa para lograr la sostenibilidad del medio ambiente, este equilibrio implica hacer compatible la explotación de recursos con la preservación a largo plazo (García, 2002).

Para evaluar este equilibrio, se emplean Indicadores de Sostenibilidad que se basan en los índices de Presión-Estado-Respuesta. Lograr la sostenibilidad requiere un conocimiento exhaustivo de la problemática en cuestión. En este trabajo, se pone énfasis en el suelo es un recurso natural importante, y se aborda uno de sus mayores desafíos recientes para mantener su sostenibilidad, que es la contaminación, particularmente la causada por metales pesados; este enfoque destaca la necesidad de comprender a fondo en el suelo la actividad antrópica tiene un gran efecto y cómo la disponibilidad de metales traza que puede afectar la salud y capacidad para sustentar la vida. Proporcionar información detallada sobre estos aspectos es esencial para guiar políticas y prácticas que promuevan la explotación sostenible de recursos sin comprometer la integridad a largo plazo del suelo y, por ende, del medio ambiente (García, 2002).

2.2.1.2. Comportamiento del Cd, Zn, Mn, Cu yPb en la fase solida del suelo

La presencia de otros metales en el suelo, como zinc (Zn) y cobre (Cu), también puede influir en el comportamiento del cadmio debido a efectos competitivos en los sitios de adsorción. El fenómeno conocido como "efecto antagónico" puede disminuir la adsorción del cadmio cuando estos elementos están presentes en altas concentraciones (Sposito, 1989).

Desde una perspectiva ambiental, la acumulación de cadmio en la fase sólida del suelo representa un riesgo significativo para la salud humana y el ecosistema. Esto se debe a que, aunque el cadmio pueda permanecer inmovilizado en las partículas del suelo, condiciones ambientales como acidificación o cambios en el potencial redox pueden liberar este metal, aumentando su disponibilidad para las plantas y, en consecuencia, su ingreso a la cadena alimentaria (Kabata-Pendias, 2011).

2.2.1.2.1. Cadmio

El cadmio (Cd) es un elemento traza pesado de alta toxicidad que, aunque presente de forma natural en el medio ambiente, ha aumentado sus concentraciones en los suelos debido a actividades antropogénicas como la minería, la industria, y el uso de fertilizantes fosfatados y residuos industriales. Su comportamiento en la fase sólida del suelo está controlado por complejas interacciones fisicoquímicas y biológicas, que determinan su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad.

En los suelos, el cadmio puede encontrarse adsorbido a partículas de arcilla, materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso. La adsorción es influenciada principalmente por el pH del suelo, ya que a valores bajos de pH (suelos ácidos), el cadmio tiende a ser más móvil y biodisponible debido a una menor capacidad de adsorción en las superficies de los coloides del suelo (McBride, 1994). En cambio, en suelos con pH alcalino, se favorece la precipitación del Cd como carbonatos o hidróxidos, reduciendo su movilidad.

Además, la materia orgánica juega un papel clave en el comportamiento del cadmio en la fase sólida. Los compuestos orgánicos, como los ácidos húmicos y fúlvicos, pueden formar complejos con el cadmio, aumentando o disminuyendo su movilidad dependiendo de la estabilidad de los complejos formados (Alloway, 2013). Por otro lado, los óxidos de hierro y manganeso actúan como sitios de adsorción efectivos, atrapando el cadmio y limitando su transporte a otras fases del suelo o al agua subterránea.

2.2.1.2.2. Zinc (Zn)

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial para las plantas, animales y microorganismos, pero cuando se encuentra en altas concentraciones en el suelo puede volverse tóxico. Su presencia en la fase sólida del suelo está regulada por procesos de adsorción, intercambio iónico, complejación con materia orgánica y precipitación en minerales secundarios, lo que afecta su movilidad y biodisponibilidad.

En el suelo, el zinc está presente principalmente en formas adsorbidas a la superficie de minerales como los óxidos de hierro, manganeso y aluminio, así como a partículas de arcilla y materia orgánica (Alloway, 2013). El pH del suelo juega un papel crucial en su comportamiento. A pH bajo (suelos ácidos), el zinc es más soluble y móvil, mientras que en suelos alcalinos tiende a precipitar como hidróxidos, carbonatos o fosfatos, lo que reduce su movilidad y disponibilidad para las plantas (Kabata-Pendias, 2011).

La materia orgánica es otro factor determinante en el comportamiento del zinc en la fase sólida. Los compuestos orgánicos, como los ácidos húmicos y fúlvicos, pueden

formar complejos con el zinc, estabilizando o aumentando su movilidad dependiendo de las condiciones del suelo. Por ejemplo, en suelos ricos en materia orgánica, el zinc tiende a estar más inmovilizado debido a la formación de complejos fuertes con compuestos orgánicos (McBride, 1994).

Además, los óxidos de manganeso y hierro son sitios clave para la adsorción del zinc. Estos óxidos tienen una alta afinidad por los iones de zinc y pueden retenerlos en la fase sólida del suelo, limitando su lixiviación hacia aguas subterráneas (Sposito, 1989). Sin embargo, cambios en el potencial redox, como los causados por procesos de anegamiento o drenaje, pueden alterar estas asociaciones y liberar el zinc al suelo o al agua circundante.

En términos ambientales, la acumulación de zinc en el suelo puede provenir de fuentes naturales y antropogénicas, como fertilizantes, residuos industriales y emisiones mineras. Aunque su función como nutriente esencial es importante, las concentraciones excesivas de zinc pueden causar efectos tóxicos en plantas y microorganismos, lo que afecta negativamente la fertilidad del suelo y la salud de los ecosistemas (Kabata-Pendias, 2011).

El comportamiento del zinc en la fase sólida del suelo está influenciado por el pH, la materia orgánica, los óxidos metálicos y las interacciones con otros metales. Comprender estos procesos es fundamental para gestionar la toxicidad del zinc en suelos contaminados y garantizar su disponibilidad en niveles adecuados para el crecimiento vegetal.

2.2.1.2.3. Plomo

La aplicación de fungicidas, herbicidas o pesticidas que contienen plomo resulta en la introducción de plomo a la tierra agrícola; este proceso directamente se vincula con el uso de estos productos químicos, ya que el plomo presente en dichos compuestos puede ser depositado en el suelo durante su aplicación, esta práctica, si no se maneja adecuadamente, puede contribuir a la acumulación de plomo en el suelo, planteando preocupaciones sobre la contaminación y sus posibles impactos en la salud ambiental; por lo tanto, la gestión responsable de los agroquímicos que contienen plomo es esencial para prevenir la contaminación del suelo y sus consecuencias asociadas (Moreno, 2018).

2.2.1.2.4. Manganeso (Mn)

El manganeso (Mn) es un elemento esencial para los procesos biológicos de las plantas y los microorganismos, desempeñando un papel fundamental en actividades enzimáticas y fotosintéticas. Sin embargo, en concentraciones elevadas puede ser tóxico para las plantas y organismos del suelo. Su comportamiento en la fase sólida del suelo está influenciado por factores como el pH, el potencial redox, la materia orgánica y las interacciones con otros elementos.

En el suelo, el manganeso se encuentra en diferentes formas: como ión intercambiable, asociado a materia orgánica, adsorbido en minerales de arcilla o formando óxidos e hidróxidos. Los óxidos de manganeso son particularmente importantes, ya que actúan como adsorbentes y reguladores de la movilidad de otros metales en el suelo (Kabata-Pendias, 2011). Estos óxidos tienen una alta capacidad de intercambio catiónico y, dependiendo de las condiciones ambientales, pueden liberar o inmovilizar manganeso.

El comportamiento del manganeso está estrechamente relacionado con el pH y el potencial redox del suelo. En suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$), el manganeso se encuentra en su forma más soluble, como Mn^{2+} , lo que incrementa su disponibilidad para las plantas pero también su potencial de toxicidad (McBride, 1994). Por el contrario, en suelos neutros o alcalinos, el manganeso tiende a precipitarse como óxidos insolubles, reduciendo su movilidad. Las condiciones de reducción, como las que ocurren en suelos saturados de agua, favorecen la solubilización del manganeso, aumentando su concentración en la solución del suelo (Sposito, 1989).

La materia orgánica también influye en el comportamiento del manganeso. Los compuestos orgánicos pueden formar complejos con Mn^{2+} , estabilizándolo en la solución del suelo o inmovilizándolo dependiendo de las características de los ligandos orgánicos presentes. En suelos con altos contenidos de materia orgánica, el manganeso puede estar menos disponible para las plantas debido a su fuerte asociación con compuestos orgánicos (Alloway, 2013).

Además, el manganeso interactúa con otros elementos presentes en el suelo. Por ejemplo, compite con el hierro (Fe) y otros cationes como el cobre (Cu) y el zinc (Zn) por los sitios de adsorción en minerales y materia orgánica. Estas interacciones pueden influir en su disponibilidad y movilidad, especialmente en suelos contaminados con múltiples metales pesados (Kabata-Pendias, 2011).

El manganeso tiene una notable capacidad para oxidarse y reducirse bajo diferentes condiciones ambientales, lo que lo convierte en un regulador clave de los procesos biogeoquímicos del suelo. Sus óxidos, además de inmovilizar manganeso, también controlan la movilidad de otros contaminantes, como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd), a través de procesos de adsorción y coprecipitación (McBride, 1994). La conciencia de estas fuentes y la adopción de prácticas sostenibles son esenciales para abordar los riesgos asociados con la presencia de manganeso en el suelo y su potencial transferencia a los cultivos (Caiza, 2018).

2.2.1.2.5. Cobre (Cu)

El cobre (Cu) es un micronutriente esencial para los procesos metabólicos de las plantas, como la fotosíntesis y la respiración, al ser un componente fundamental de diversas enzimas. Sin embargo, en concentraciones elevadas, el cobre puede ser tóxico para los organismos del suelo y las plantas, afectando negativamente la biodiversidad del ecosistema edáfico (Alloway, 2013). En la fase sólida del suelo, el comportamiento del cobre está influenciado por factores como el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la textura del suelo y las interacciones con otros metales.

En el suelo, el cobre se encuentra principalmente en formas inmovilizadas: adsorbido en minerales de arcilla, asociado con óxidos de hierro y manganeso, o formando complejos estables con la materia orgánica (McBride, 1994). Su forma soluble, como Cu^{2+} , es la que está disponible para las plantas, aunque esta fracción representa un porcentaje muy pequeño del total del cobre presente en el suelo.

El pH es uno de los principales factores que controlan la movilidad y disponibilidad del cobre. En suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$), el cobre es más soluble y, por lo tanto, más móvil, lo que aumenta su biodisponibilidad y potencial toxicidad para las plantas. En suelos neutros o alcalinos ($\text{pH} > 7$), el cobre tiende a inmovilizarse formando hidróxidos insolubles, óxidos o precipitados con carbonatos, reduciendo su movilidad (Kabata-Pendias, 2011). Esto explica por qué los suelos ácidos suelen ser más vulnerables a la contaminación por cobre.

La materia orgánica del suelo juega un papel crucial en la dinámica del cobre. Los compuestos orgánicos, como los ácidos húmicos y fúlvicos, forman complejos estables con el cobre, lo que reduce su disponibilidad en la solución del suelo, pero también lo protege

de procesos de lixiviación. Estos complejos orgánicos suelen ser más predominantes en suelos con altos niveles de materia orgánica, como los suelos forestales o los suelos ricos en residuos agrícolas (Alloway, 2013).

Los óxidos de hierro y manganeso presentes en el suelo también influyen en el comportamiento del cobre al actuar como superficies de adsorción. Estos óxidos tienen una alta afinidad por el Cu^{2+} , inmovilizándolo y limitando su movilidad. Este proceso es especialmente relevante en suelos tropicales, donde los óxidos de hierro son abundantes (McBride, 1994).

Por otro lado, las interacciones entre el cobre y otros metales, como el zinc (Zn) y el cadmio (Cd), afectan su comportamiento en la fase sólida del suelo. Estos metales compiten por los mismos sitios de adsorción en minerales y materia orgánica, lo que puede alterar su biodisponibilidad y movilidad dependiendo de sus concentraciones relativas. En suelos contaminados, esta competencia puede amplificar los efectos tóxicos al incrementar la solubilidad de ciertos metales (Kabata-Pendias, 2011).

2.2.2. Parámetro fisicoquímico del suelo degradado

2.2.2.1. Parámetros físicos del suelo

De acuerdo con el autor Rucks et al. (2004), nos menciona que las características físicas de los suelos desempeñan un papel fundamental en la determinación de su capacidad para satisfacer diversas necesidades humanas. La condición física de un suelo tiene un impacto significativo en aspectos como la rigidez, la fuerza de sostenimiento, la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y retención de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes. Estos factores son esenciales para comprender y gestionar de manera efectiva el suelo. Para aquellos involucrados en la utilización de la tierra, poseer un conocimiento detallado de las propiedades físicas del suelo resulta crucial. Esta comprensión permite discernir cómo estas propiedades influyen en el crecimiento de las plantas, cómo la actividad humana puede modificarlas y por qué es esencial mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles. La gestión adecuada de estas propiedades no solo contribuye al rendimiento agrícola, sino que también promueve la conservación a largo plazo de la salud y la productividad del suelo. En resumen, la atención cuidadosa a las características físicas del suelo es fundamental para garantizar un uso sostenible de la tierra y el mantenimiento de la fertilidad del suelo a lo largo del tiempo.

2.2.2.1.1. Textura

Según (FAO, 2024) nos menciona que la textura del suelo se refiere a la proporción de componentes inorgánicos en diversas formas y tamaños, tales como arena, limo y arcilla. Esta característica es esencial debido a su impacto en la fertilidad del suelo y su capacidad para retener agua, permitir la aireación, facilitar el drenaje, así como en el contenido de materia orgánica y otras características del suelo. La clasificación de la textura del suelo se lleva a cabo utilizando el triángulo de textura de suelos de acuerdo con la FAO, funcionando como una herramienta para categorizar la textura. En este contexto, las partículas de suelo con un tamaño superior a 2.0 mm, como piedras y gravas, también se consideran en la clasificación de textura. Por ejemplo, un suelo arenoso que contiene un 20% de grava se clasificaría como franco arenoso con presencia de gravas. Además, cuando los componentes orgánicos son predominantes, se forman suelos orgánicos en lugar de suelos minerales. Comprender la textura del suelo resulta esencial para una gestión adecuada de las tierras y para optimizar su uso en diversas aplicaciones, que van desde la agricultura hasta la conservación. Este conocimiento profundo permite tomar decisiones informadas sobre prácticas agrícolas, selección de cultivos y estrategias de conservación del suelo, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia en el manejo de los recursos terrestres. El triángulo textural es una herramienta fundamental en la clasificación de suelos, proporcionando una representación gráfica de la proporción de los tres componentes principales: arena, limo y arcilla. Desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), este triángulo facilita la identificación y categorización de la textura del suelo. La posición relativa de cada uno de estos componentes en el triángulo textural define la clase de suelo. Por ejemplo, suelos que se encuentran en la esquina superior izquierda del triángulo tienen una alta proporción de arena, mientras que aquellos en la esquina inferior derecha son ricos en arcilla. Los suelos que se sitúan en el área central del triángulo poseen una combinación equilibrada de arena, limo y arcilla, y se conocen como suelos francos. Además, el triángulo textural también tiene en cuenta la presencia de partículas de tamaño superior a 2.0 mm, como gravas y piedras, que pueden influir en la textura del suelo. Esta herramienta es esencial para los profesionales agrícolas, ecologistas y geólogos, ya que permite una rápida y precisa clasificación de los suelos, facilitando la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la tierra, la elección de cultivos y la conservación del suelo. En última instancia,

el triángulo textural contribuye significativamente a la comprensión y utilización eficiente de los recursos terrestres (FAO, 2024).

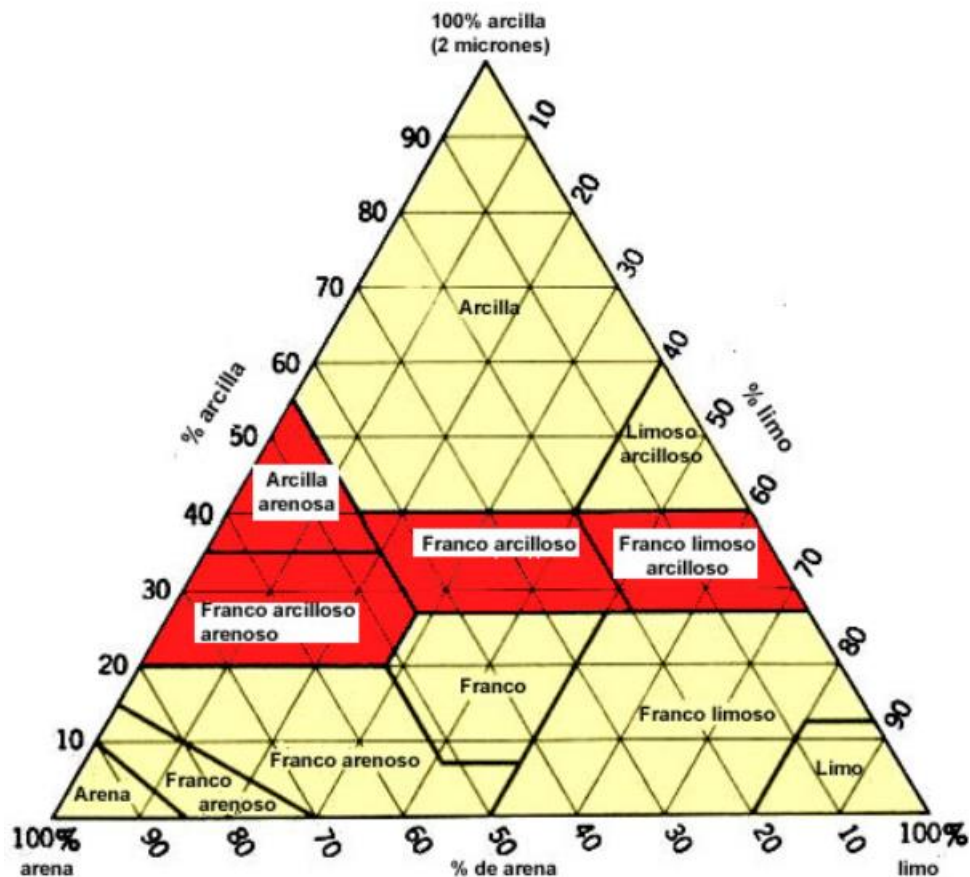


Figura 1. Diagrama triangular de las clases texturales.

2.2.2.1.2. Conductividad eléctrica

La medición de la conductividad eléctrica (CE) en el suelo es una medida que evalúa la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica. Este parámetro es crucial para comprender la calidad del suelo y sus propiedades físicas y químicas. La CE se expresa en decisiemens por metro (dS/m) y proporciona información sobre la presencia de sales solubles en el suelo. La medición de la CE es especialmente relevante en la agricultura, ya que altos niveles pueden indicar la acumulación de sales, afectando la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Por otro lado, bajos niveles de CE pueden sugerir una falta de sales solubles esenciales para el crecimiento vegetal. Un monitoreo regular de la CE permite a los agricultores ajustar la fertilización y el riego para mantener condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos. Además, la interpretación de los niveles de conductividad eléctrica en el suelo es esencial para prevenir problemas como la

salinidad y garantizar la productividad sostenible de las tierras agrícolas. Se evalúa su capacidad para conducir electricidad, junto con la conductividad eléctrica aparente (CEa), una medida promedio de esta conductividad a lo largo del perfil del suelo hasta una profundidad específica determinada por el equipo utilizado, puede llevarse a cabo de manera intensiva y económica. Esta práctica se considera una herramienta valiosa para caracterizar la variación espacial en las propiedades edáficas del suelo, lo que, a su vez, permite optimizar los muestreos de suelos y mejorar el rendimiento de los cultivos. La georreferenciación de estas mediciones proporciona información detallada sobre la distribución de la conductividad eléctrica en el espacio, lo que facilita la toma de decisiones precisas en la gestión agrícola y la comprensión de las condiciones del suelo en diferentes áreas de un terreno (López et al. 2015).

2.2.2.2. Parámetros químicos del suelo

Las propiedades químicas del suelo constituyen un componente esencial que influye directamente en la calidad y disponibilidad de agua y nutrientes fundamentales para el crecimiento saludable de las plantas. Entre estas propiedades químicas, se destacan el pH, la cantidad de materia orgánica presente, la conductividad eléctrica y la disponibilidad de nutrientes específicos como el fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K), los cuales pueden extraerse del suelo para su evaluación. El pH del suelo, que mide su acidez o alcalinidad, tiene un impacto significativo en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Un pH adecuado es esencial para garantizar que los elementos esenciales estén en una forma que las plantas puedan absorber eficientemente. La cantidad de materia orgánica presente en el suelo también desempeña un papel crucial, ya que influye en la estructura del suelo, su capacidad para retener agua y nutrientes, así como en la actividad biológica del suelo. La conductividad eléctrica del suelo, medida en decisiemens por metro (dS/m), indica la presencia de sales solubles. Este parámetro es vital para evaluar la salinidad del suelo, ya que altas concentraciones pueden afectar negativamente la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas. Además, la disponibilidad de nutrientes específicos, como el fósforo, nitrógeno y potasio, es esencial para el crecimiento y desarrollo óptimos de las plantas. Estos nutrientes son fundamentales en diversos procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas, desde la fotosíntesis hasta la formación de estructuras celulares. La evaluación de estos indicadores químicos es fundamental para determinar la idoneidad del suelo como medio de cultivo. Un suelo con propiedades químicas equilibradas proporciona un entorno favorable para el desarrollo de

las plantas, garantizando la disponibilidad adecuada de nutrientes y agua. La comprensión detallada de estas propiedades químicas no solo es esencial para la agricultura, sino también para la gestión sostenible del suelo y la conservación a largo plazo de los recursos naturales y garantizar la disponibilidad adecuada de nutrientes esenciales (Calderón et al. 2018).

2.2.2.2.1. Potencial de hidrógeno (pH)

Según la (FAO, 2024), el potencial de hidrógeno del suelo, conocido como pH, es un indicador crítico que refleja la acidez o alcalinidad del suelo. Este parámetro mide la concentración de iones de hidrógeno en la solución del suelo y tiene una influencia directa en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La escala de pH varía de 0 a 14, donde un pH de 7 es considerado neutro. Un pH por debajo de 7 indica acidez, mientras que un pH por encima de 7 indica alcalinidad. La mayoría de las plantas prefieren un rango de pH ligeramente ácido a ligeramente alcalino para optimizar la absorción de nutrientes esenciales. El pH del suelo influye en la solubilidad de los nutrientes, afectando su disponibilidad para las plantas. Un pH inadecuado puede limitar la absorción de elementos esenciales como el fósforo, nitrógeno y potasio, lo que impacta directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La monitorización regular del pH del suelo es esencial para los agricultores, permitiendo ajustes precisos en la fertilización y enmiendas del suelo para mantener un entorno óptimo para el crecimiento de cultivos. La comprensión del pH del suelo es, por lo tanto, fundamental para garantizar la salud de los cultivos y la eficiencia en el uso de los recursos agrícolas.

2.2.2.2.2. Materia orgánica (M.O)

La evolución de la materia orgánica en el suelo son procesos esenciales que desempeñan un papel fundamental en el fomento del crecimiento de las plantas y en la salud general del suelo. La materia orgánica en el suelo se compone principalmente de residuos orgánicos en diferentes estados de descomposición, como hojas caídas, restos de plantas, materiales animales y otros componentes biológicos en descomposición. Este componente orgánico en el suelo contribuye a la mejora de su estructura física y a la retención de agua. Actúa como un reservorio de nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno, el fósforo y el azufre, liberándolos gradualmente a medida que se descompone. La presencia de materia orgánica también promueve la actividad microbiana beneficiosa en el suelo, creando un entorno propicio para una diversidad de organismos que descomponen la materia orgánica y mejoran la

disponibilidad de nutrientes. Además, la materia orgánica en el suelo contribuye a la mitigación del cambio climático al actuar como un sumidero de carbono. La descomposición de residuos orgánicos en condiciones anaeróbicas puede generar emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano, pero cuando se fomenta la descomposición aeróbica en suelos ricos en materia orgánica, se favorece la retención de carbono en el suelo, ayudando así a reducir las emisiones (Julca et al. 2006). Los agricultores y gestores de tierras reconocen la importancia de mantener y aumentar la materia orgánica en el suelo a través de prácticas agrícolas sostenibles. El uso de técnicas como la rotación de cultivos, la incorporación de residuos orgánicos y el uso de abonos verdes contribuye significativamente a la mejora de la materia orgánica en el suelo. En general, la materia orgánica en el suelo no solo es esencial para el crecimiento de las plantas, sino que también desempeña un papel crucial en la sostenibilidad y la salud a largo plazo de los suelos agrícolas y naturales. La promoción de prácticas que fomenten la acumulación de materia orgánica contribuye a la conservación de la fertilidad del suelo y al equilibrio del ecosistema. Durante esta etapa, los microorganismos presentes en el suelo interactúan con la materia orgánica, dando inicio al proceso de descomposición y liberación de nutrientes. La mineralización es la fase subsiguiente en la que los componentes orgánicos se descomponen aún más, liberando nutrientes en formas que las plantas pueden absorber y utilizar (Julca et al. 2006).

2.2.2.2.3. Capacidad de intercambio catiónico

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en el suelo es un parámetro crucial que influye significativamente en la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes esenciales a las plantas. Este concepto se refiere a la capacidad del suelo para intercambiar iones positivos (cationes) en su solución, desempeñando un papel esencial en la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas. La CIC está directamente relacionada con la presencia de arcillas y materia orgánica en el suelo, ya que estos componentes poseen sitios de intercambio donde los cationes pueden unirse. Una CIC saludable permite al suelo retener nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y otros elementos esenciales, liberándolos gradualmente para las plantas a medida que sea necesario. La medición de la CIC es vital para entender la capacidad del suelo para sostener la fertilidad y determinar su idoneidad para el cultivo. Suelos con una CIC adecuada tienden a tener una mayor capacidad de retención de nutrientes, proporcionando un entorno más estable y equilibrado para el desarrollo de las plantas. La gestión cuidadosa de la CIC

es esencial para optimizar la fertilización y mejorar la eficiencia del uso de nutrientes en la agricultura. La aplicación de prácticas sostenibles, como la incorporación de materia orgánica al suelo y la selección adecuada de cultivos, puede contribuir a mantener y mejorar la CIC del suelo. En general, la Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo es un indicador valioso que juega un papel crítico en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Su comprensión y gestión adecuada son esenciales para promover la fertilidad del suelo y asegurar la productividad sostenible en la agricultura y otros sistemas de uso de la tierra (FAO, 2024).

2.2.2.2.4. Nitrógeno total

A pesar de su ubicuidad en la naturaleza, el nitrógeno en el suelo es esencial para la nutrición de las plantas y se encuentra en formas iónicas que las plantas pueden asimilar, como el amonio (NH_4^+) en forma catiónica y el nitrato (NO_3^-) en forma aniónica. Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de su presencia generalizada, El nitrógeno en el suelo se presenta en diversas formas, siendo una de ellas la forma inorgánica. Esta variante de nitrógeno comprende compuestos químicos que no contienen enlaces carbono-nitrógeno (C-N), y es fundamental en el ciclo del nitrógeno, un proceso esencial para el funcionamiento de los ecosistemas y el crecimiento de las plantas. Las formas inorgánicas de nitrógeno incluyen el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-). El amonio es la forma reducida de nitrógeno, mientras que el nitrato es su forma oxidada. Ambas son absorbidas por las plantas como fuentes de nutrientes esenciales para su desarrollo y crecimiento. La disponibilidad de nitrógeno en forma inorgánica está sujeta a procesos biogeoquímicos en el suelo, como la mineralización, nitrificación y desnitrificación. Durante la mineralización, la materia orgánica se descompone, liberando amonio. La nitrificación convierte el amonio en nitrato, y la desnitrificación transforma el nitrato en gas nitrógeno, cerrando el ciclo (FAO, 2024). La gestión adecuada del nitrógeno en forma inorgánica es esencial en la agricultura para maximizar la eficiencia del uso de este nutriente y minimizar pérdidas al medio ambiente, evitando problemas como la contaminación del agua y emisiones de gases de efecto invernadero. En general, la presencia del nitrógeno en forma inorgánica en el suelo es un aspecto clave para el desarrollo de las plantas y el equilibrio de los ecosistemas. Comprender los procesos que regulan su disponibilidad es crucial para la gestión sostenible de los recursos y la conservación del medio ambiente. (FAO, 2024).

2.2.2.2.5. Fósforo total

Según Novello & Quintero (2007), nos dice que, Con la intensificación del uso agrícola-ganadero de los suelos, que incluye la práctica de la agricultura continua, se ha observado la aparición de situaciones en las que se generan desbalances negativos de fósforo (P). Esta tendencia refleja un problema significativo en la gestión de nutrientes del suelo, ya que el fósforo es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo saludable de las plantas. La agricultura continua, que implica la sucesión constante de cultivos sin períodos de descanso o rotación adecuada, puede agotar rápidamente los niveles de fósforo en el suelo. Este agotamiento se debe a la absorción constante de fósforo por parte de los cultivos sin una reposición adecuada a través de prácticas de manejo del suelo y fertilización estratégica (Novello & Quintero, 2007). Los balances negativos de fósforo pueden tener consecuencias perjudiciales para la productividad del suelo a largo plazo. La deficiencia de fósforo afecta la salud de las plantas, reduciendo su capacidad para llevar a cabo procesos clave como la fotosíntesis, la transferencia de energía y la síntesis de ADN. Para abordar este problema, se requieren estrategias de manejo del suelo que incluyan prácticas como la rotación de cultivos, la incorporación de materia orgánica y el uso adecuado de fertilizantes ricos en fósforo. Estas medidas contribuyen a mantener un equilibrio nutricional en el suelo y a prevenir la pérdida continua de este elemento vital. En general, la intensificación del uso agrícola-ganadero, especialmente en el contexto de la agricultura continua, puede conducir a desbalances negativos de fósforo en el suelo. La implementación de prácticas de gestión sostenible es esencial para preservar la salud del suelo y garantizar la disponibilidad adecuada de nutrientes para las plantas, asegurando así la productividad a largo plazo de las tierras de cultivo. Esto significa que hay deficiencias de P en muchos cultivos, a pesar del uso de fertilizantes en los últimos, quince años a pesar de los esfuerzos realizados con fertilizantes, los balances de nutrientes, especialmente en el caso del fósforo, continúan siendo desfavorables.

2.2.2.2.6. Potasio

Vistoso & Martínez, (2020), Las plantas realizan la absorción de potasio principalmente en forma de iones de potasio (K^+) directamente desde la solución del suelo, y es interesante destacar que este K^+ puede derivar tanto de fracciones

intercambiables como no intercambiables del suelo. El potasio es uno de los nutrientes esenciales para el desarrollo saludable de las plantas, desempeñando roles cruciales en diversos procesos fisiológicos, como la regulación osmótica, la activación de enzimas, la fotosíntesis y la resistencia a enfermedades y estrés. La disponibilidad de potasio en el suelo influye directamente en la capacidad de las plantas para cumplir con sus funciones vitales. La fracción intercambiable de potasio se refiere a los iones K^+ que están temporalmente unidos a las partículas del suelo y pueden ser liberados para ser absorbidos por las raíces de las plantas. Por otro lado, la fracción no intercambiable comprende el potasio presente en minerales primarios y secundarios, que requiere procesos más prolongados para su liberación y absorción por parte de las plantas. La comprensión de cómo las plantas absorben el potasio y cómo este nutriente se encuentra disponible en el suelo es esencial para la gestión adecuada de la fertilidad del suelo en la agricultura. Prácticas de manejo del suelo, como la aplicación estratégica de fertilizantes ricos en potasio y la rotación de cultivos, son fundamentales para garantizar un suministro adecuado de este nutriente esencial y optimizar la productividad de los cultivos (Vistoso & Martínez, 2020). Esencialmente, solo alrededor del 2% del potasio en el suelo se encuentra en formas disponibles para las plantas (K^+ en solución + K^+ intercambiable), lo que resalta la importancia de comprender las formas y disponibilidad del potasio para una gestión eficiente de la fertilidad del suelo.

2.2.2.2.7. Carbono orgánico

El carbono orgánico del suelo (COS) es uno de los parámetros químicos más importantes para evaluar la calidad y fertilidad del suelo. Este componente representa la fracción de carbono presente en la materia orgánica del suelo (MOS), que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, así como sustancias húmicas estabilizadas (Six et al., 2000). Su cantidad y dinámica son indicadores clave de la salud del suelo, ya que está estrechamente relacionado con la capacidad del suelo para retener agua, almacenar nutrientes y sustentar la actividad biológica.

Como parámetro químico, el COS desempeña un papel fundamental en los procesos de intercambio iónico, ya que la materia orgánica del suelo contribuye a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), favoreciendo la disponibilidad de nutrientes esenciales como el calcio, magnesio y potasio (Lal, 2004). Además, el carbono orgánico está directamente relacionado con la estabilización de los agregados del suelo, un factor que mejora la porosidad, la infiltración de agua y la resistencia a la erosión (Batjes, 1996).

El contenido de COS en el suelo puede variar según factores como el clima, el tipo de uso del suelo y las prácticas de manejo agrícola. En sistemas agrícolas intensivos, las actividades como el laboreo profundo o el uso excesivo de fertilizantes pueden acelerar la mineralización del carbono orgánico, liberando dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera y reduciendo los niveles de COS en el suelo. Por otro lado, prácticas como el manejo de residuos orgánicos, la rotación de cultivos y el uso de cultivos de cobertura pueden aumentar la acumulación de carbono orgánico, contribuyendo a la sostenibilidad del suelo (Lal, 2015).

El COS también actúa como un sumidero importante de carbono en el contexto del cambio climático. Se estima que el suelo contiene aproximadamente el doble de carbono que la atmósfera, lo que resalta su potencial para mitigar el calentamiento global mediante prácticas de manejo que favorezcan la captura de carbono atmosférico en el suelo (Six et al., 2000). En este sentido, la conservación de la materia orgánica del suelo no solo tiene implicaciones para la producción agrícola, sino también para la regulación de los ciclos biogeoquímicos globales.

2.2.2.2.8. Óxido de potasio (K_2O)

El óxido de potasio (K_2O) es un parámetro químico clave en la evaluación de la fertilidad del suelo, ya que es una forma indirecta de expresar la disponibilidad de potasio (K), un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. El potasio juega un papel fundamental en la regulación de procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la activación enzimática y el transporte de nutrientes en las plantas (Mengel & Kirkby, 2001). Su presencia en el suelo está relacionada con la capacidad del suelo para proporcionar este nutriente en cantidades adecuadas para el desarrollo de los cultivos.

En los análisis de suelos, el contenido de K_2O se utiliza comúnmente para representar el potasio intercambiable y el soluble, que son las formas disponibles para las plantas. Este parámetro también incluye el potasio no intercambiable, que está retenido en los minerales de arcilla y liberado lentamente a través de procesos de meteorización (Brady & Weil, 2008). El balance entre estas fracciones determina la cantidad de potasio disponible para las plantas a lo largo del tiempo.

El contenido de K_2O en el suelo puede variar significativamente dependiendo del tipo de suelo, las condiciones climáticas y las prácticas de manejo agrícola. En suelos

arenosos, el potasio tiende a lixiviarse rápidamente debido a su baja capacidad de retención, mientras que en suelos arcillosos o ricos en materia orgánica, su disponibilidad puede ser mayor debido a su capacidad para retener cationes (Sparks, 2000). Sin embargo, el agotamiento de potasio en suelos sometidos a cultivos intensivos puede llevar a deficiencias, lo que reduce la productividad de los cultivos y la calidad de los productos agrícolas.

La adición de fertilizantes potásicos es una práctica común para corregir deficiencias de potasio en el suelo. Los fertilizantes suelen expresarse en términos de su contenido de K_2O , que es una medida estándar utilizada en la industria agrícola para indicar la cantidad de potasio disponible en el fertilizante. Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes puede llevar a problemas ambientales, como la acumulación de sales en el suelo y la contaminación de las aguas subterráneas (Stewart & Roberts, 2012).

2.2.2.2.9. Calcio (C)

El calcio (Ca) es un macronutriente esencial en el suelo y desempeña un papel clave tanto en la fertilidad del suelo como en el desarrollo de las plantas. Este elemento químico es crucial para la estructura del suelo, ya que ayuda a la formación de agregados estables al neutralizar cargas negativas de las partículas de arcilla y la materia orgánica, mejorando la textura, la aireación y el drenaje (Brady & Weil, 2008). Además, en las plantas, el calcio contribuye a la formación de las paredes celulares, la división celular y el crecimiento de las raíces, así como a la regulación de varios procesos enzimáticos.

En el suelo, el calcio se encuentra principalmente en formas intercambiables, retenido en el complejo de cambio catiónico, y como parte de minerales primarios y secundarios, como calcita ($CaCO_3$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). Los suelos con niveles adecuados de calcio presentan una buena capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que asegura un suministro equilibrado de nutrientes para las plantas. Sin embargo, en suelos ácidos, el calcio puede lixiviarse fácilmente, especialmente en climas húmedos, lo que puede llevar a deficiencias que afectan la fertilidad y requieren enmiendas como la aplicación de cal (lime) para aumentar el pH y reponer los niveles de calcio (Havlin et al., 2005).

El balance entre el calcio y otros nutrientes, como el magnesio (Mg) y el potasio (K), es crucial para evitar desequilibrios que puedan perjudicar el crecimiento vegetal.

Altos niveles de potasio, por ejemplo, pueden competir con el calcio en la absorción por las raíces de las plantas, mientras que niveles excesivos de calcio pueden inhibir la disponibilidad de magnesio y otros nutrientes esenciales (Fageria, 2001).

En la agricultura, el manejo del calcio se realiza a través de la aplicación de fertilizantes y enmiendas, como yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cal dolomítica o cal calcítica. Estas enmiendas no solo aportan calcio al suelo, sino que también ayudan a corregir problemas como la acidez del suelo o la toxicidad por aluminio (Al^{3+}), común en suelos muy ácidos (Marschner, 2012). Además, el calcio desempeña un papel importante en la calidad de los frutos y cultivos, ya que mejora la resistencia a enfermedades y el almacenamiento postcosecha.

2.2.2.2.10. Magnesio (Mg)

El magnesio (Mg) es un nutriente esencial en los suelos y un macronutriente secundario fundamental para el desarrollo de las plantas. Este elemento es crucial para numerosos procesos metabólicos, entre ellos su papel estructural en la molécula de clorofila, donde actúa como el ion central, permitiendo la captación de luz durante la fotosíntesis (Marschner, 2012). Además, el magnesio interviene en la activación de enzimas, la síntesis de proteínas y la translocación de carbohidratos en las plantas, desempeñando un rol vital en la productividad agrícola.

En el suelo, el magnesio se encuentra principalmente en tres formas: en solución del suelo, donde está disponible para la absorción por las plantas; en el complejo de cambio catiónico, retenido en las partículas de arcilla y materia orgánica; y en minerales primarios y secundarios, como dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y magnesita (MgCO_3). La disponibilidad de magnesio depende de factores como el pH, la textura del suelo y la competencia con otros cationes, como el potasio (K^+) y el calcio (Ca^{2+}), que pueden desplazar al magnesio de los sitios de intercambio (Brady & Weil, 2008).

En suelos ácidos y con alta lixiviación, especialmente en regiones tropicales con alta precipitación, el magnesio puede perderse fácilmente, lo que resulta en deficiencias que afectan el crecimiento y la productividad de las plantas. Los síntomas de deficiencia de magnesio en las plantas incluyen clorosis en hojas más viejas, debido a su movilidad en el floema, lo que causa la redistribución hacia tejidos jóvenes (Fageria, 2001). Para mitigar estas deficiencias, se aplican fertilizantes como sulfato de magnesio (MgSO_4), dolomita o soluciones enriquecidas con magnesio.

El equilibrio entre el magnesio y otros cationes es fundamental. Altos niveles de potasio, por ejemplo, pueden interferir con la absorción de magnesio, mientras que un exceso de calcio puede disminuir su disponibilidad en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico (Havlin et al., 2005). Por otro lado, el magnesio también contribuye a la mejora de la estructura del suelo, ya que favorece la estabilidad de los agregados y evita la compactación excesiva.

En términos de manejo agronómico, el magnesio es un componente crítico de los programas de fertilización equilibrada para maximizar el rendimiento de cultivos y mantener la fertilidad del suelo. Además, su presencia adecuada en los suelos es esencial para la salud humana, ya que influye en la calidad nutricional de los alimentos producidos.

2.2.2.2.11. Sodio (Na)

El sodio (Na) es un elemento presente en los suelos que, aunque no es considerado esencial para la mayoría de las plantas, desempeña un papel significativo en algunos cultivos tolerantes a la salinidad, como la remolacha azucarera y ciertos pastos. En pequeñas cantidades, el sodio puede sustituir parcialmente al potasio (K) en algunas funciones fisiológicas, como la regulación osmótica y el transporte de agua y nutrientes en las plantas (Marschner, 2012). Sin embargo, en concentraciones elevadas, el sodio puede convertirse en un problema para la fertilidad del suelo y la salud de los cultivos, ya que afecta negativamente las propiedades físicas y químicas del suelo.

En los suelos, el sodio está presente en dos formas principales: como sodio intercambiable, adsorbido en las superficies de las partículas del suelo, y como sodio soluble, presente en la solución del suelo. Su comportamiento está estrechamente relacionado con la relación de adsorción de sodio (RAS), un indicador de la proporción de sodio frente a otros cationes, como el calcio (Ca) y el magnesio (Mg). Un alto RAS puede llevar a la dispersión de las partículas de arcilla, lo que degrada la estructura del suelo y reduce la infiltración de agua y el drenaje (Brady & Weil, 2008).

El exceso de sodio en el suelo puede generar condiciones de sodicidad, caracterizadas por un pH elevado y una baja permeabilidad al agua. Estos suelos, conocidos como sódicos, presentan problemas de compactación y pérdida de estructura, lo que dificulta el crecimiento de las raíces y reduce la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La toxicidad por sodio también puede afectar directamente a los cultivos, causando necrosis en los bordes de las hojas y reducción en el rendimiento (Havlin et al., 2005).

El manejo de suelos con exceso de sodio se realiza a través de la aplicación de enmiendas como el yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que reemplaza el sodio adsorbido en el complejo de cambio catiónico con calcio, mejorando la estructura del suelo. Además, el lavado del sodio con agua de baja salinidad es una práctica común en regiones con buena disponibilidad hídrica. Sin embargo, estas prácticas requieren un manejo adecuado para evitar problemas secundarios, como la lixiviación de nutrientes esenciales (Qadir et al., 2001).

2.2.2.2.12. Aluminio (Al)

El aluminio (Al) es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, y en su forma iónica (Al^{3+}) puede ser un factor importante en la química del suelo, particularmente en suelos ácidos. Aunque el aluminio no es un nutriente esencial para las plantas, su presencia y concentración en el suelo pueden tener efectos significativos sobre la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas, especialmente en suelos ácidos. En su forma soluble, el aluminio puede ser tóxico para muchas plantas, afectando el desarrollo de las raíces y limitando la absorción de agua y nutrientes (Marschner, 2012).

El comportamiento del aluminio en el suelo está fuertemente influenciado por el pH. En suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$), el aluminio se disocia en la solución del suelo como iones Al^{3+} , lo que aumenta su toxicidad. Estos iones son perjudiciales para las raíces de las plantas, donde pueden interferir con la elongación de las células y afectar la absorción de nutrientes como el fósforo (P), el calcio (Ca) y el magnesio (Mg) (Foy, 1984). La toxicidad por aluminio es particularmente relevante en suelos ácidos de regiones tropicales y subtropicales, donde las precipitaciones frecuentes favorecen la lixiviación de cationes básicos, como el calcio y el magnesio, aumentando la acidez del suelo.

Por otro lado, en suelos con un pH más alto (alcalinos o neutros), el aluminio se encuentra principalmente en forma de óxidos e hidróxidos, como la gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), que son mucho menos solubles y, por lo tanto, menos tóxicos para las plantas (Havlin et al., 2005). Sin embargo, en suelos con niveles elevados de aluminio intercambiable (Al^{3+}) en sus complejos de cambio catiónico, la fertilidad del suelo puede verse afectada, ya que el aluminio compite con otros nutrientes esenciales por los sitios de adsorción en la superficie de las partículas del suelo, dificultando la disponibilidad de estos nutrientes para las plantas.

Además, el aluminio puede formar complejos con otros cationes como el hierro (Fe) y el manganeso (Mn), modificando su comportamiento en el suelo. En algunos casos, los complejos de aluminio con hierro o manganeso pueden precipitarse y formar minerales insolubles, lo que puede disminuir la biodisponibilidad de estos nutrientes y contribuir a la acidificación del suelo (McBride, 1994).

El manejo de suelos ácidos con altas concentraciones de aluminio se realiza a menudo mediante la aplicación de enmiendas alcalinas, como la cal (CaCO_3), que eleva el pH del suelo, reduciendo así la solubilidad del aluminio y mejorando las condiciones para el crecimiento de las plantas. La mejora de la estructura del suelo mediante el uso de materia orgánica también puede ayudar a mitigar la toxicidad del aluminio, al aumentar la capacidad de retención de nutrientes y mejorar la actividad microbiana, que ayuda a neutralizar el aluminio soluble (Foy, 1984).

2.2.2.2.13. Hidrogeno (H)

El hidrógeno (H) es un elemento fundamental en los suelos, principalmente en su forma de iones hidrógeno (H^+), que influyen significativamente en el pH y, por ende, en la química del suelo. El pH del suelo, que mide la concentración de H^+ en la solución del suelo, es un parámetro crítico para determinar la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la movilidad de los metales pesados en el suelo (Marschner, 2012).

En suelos ácidos, la concentración de H^+ es alta, lo que disminuye el pH del suelo y, a su vez, aumenta la solubilidad de varios nutrientes, como el aluminio (Al) y el manganeso (Mn), que en niveles elevados pueden ser tóxicos para las plantas. Por otro lado, un pH bajo puede dificultar la disponibilidad de nutrientes esenciales como el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el fósforo (P), ya que se vuelven menos solubles en condiciones ácidas (Havlin et al., 2005). En suelos alcalinos (pH alto), los iones H^+ son menos abundantes, lo que puede limitar la solubilidad de algunos nutrientes y afectar negativamente el crecimiento de las plantas.

El hidrógeno también juega un papel importante en el proceso de intercambio iónico en el suelo, ya que los iones H^+ pueden competir con otros cationes, como el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), por los sitios de adsorción en las partículas del suelo. En suelos con un pH bajo, el exceso de H^+ puede reemplazar estos cationes importantes en el

complejo de intercambio catiónico (CIC), lo que altera la estructura del suelo y reduce su capacidad de retener nutrientes esenciales para las plantas (Brady & Weil, 2008).

La relación entre el hidrógeno y el pH es fundamental en los procesos de acidificación y desacidificación del suelo. La acidificación del suelo, que se produce por la acumulación de iones H^+ , es común en regiones con alta precipitación y en suelos que experimentan una intensa actividad biológica o agrícola. La aplicación de fertilizantes nitrogenados, como el nitrato de amonio, también puede contribuir a la acidificación del suelo, ya que el amonio (NH_4^+) se convierte en iones H^+ durante su mineralización (Marschner, 2012). Para contrarrestar la acidez del suelo, se utilizan enmiendas alcalinas como la cal ($CaCO_3$), que neutralizan los iones H^+ y elevan el pH, mejorando así las condiciones para el crecimiento de las plantas.

Además de su influencia en el pH, el hidrógeno también es crucial en el proceso de formación de agregados del suelo. Los iones H^+ pueden afectar la floculación o dispersión de las partículas de arcilla, lo que afecta la estructura del suelo. En suelos ácidos, la presencia de iones H^+ puede promover la dispersión de las partículas, lo que resulta en una menor infiltración de agua y mayor susceptibilidad a la erosión (Brady & Weil, 2008).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Uso intensivo de herbicidas

La Advierte sobre la práctica común de la aplicación de herbicidas en la agricultura se ha convertido en una práctica común con el objetivo de mejorar la productividad de los cultivos al controlar las malezas que compiten por nutrientes, luz solar y espacio. Estos compuestos químicos han demostrado ser efectivos para eliminar las plantas no deseadas, facilitando así el crecimiento óptimo de los cultivos seleccionados y aumentando los rendimientos agrícolas. El uso de herbicidas ofrece varios beneficios, como la reducción de la competencia entre cultivos y malezas, el ahorro de mano de obra y recursos, y la mejora general de la eficiencia en la producción de alimentos. Sin embargo, es crucial abordar y reconocer los riesgos asociados con el uso extensivo de herbicidas, ya que esto puede conducir a problemas significativos de contaminación ambiental. La contaminación ambiental resultante del uso excesivo de herbicidas se manifiesta en la presencia de estos compuestos en suelos, agua y aire. La escorrentía de herbicidas aplicados en campos agrícolas puede llegar a cuerpos de agua cercanos, afectando negativamente a los ecosistemas acuáticos y a la biodiversidad. Además, la

deriva de herbicidas durante la aplicación puede afectar áreas no destinadas al cultivo, dañando plantas no objetivo y afectando a la fauna circundante. El desarrollo de resistencia en las malezas es otro problema asociado con el uso intensivo de herbicidas. La exposición constante a estos compuestos puede llevar a la evolución de cepas de malezas resistentes, lo que requiere el uso de dosis más altas o herbicidas más fuertes para lograr el mismo efecto, generando un ciclo potencialmente perjudicial (Barba, 2019). En este contexto, es esencial adoptar prácticas agrícolas sostenibles y estrategias de manejo integrado de plagas que reduzcan la dependencia de herbicidas. La rotación de cultivos, la cobertura del suelo y la implementación de métodos alternativos de control de malezas son enfoques que pueden ayudar a minimizar la presión sobre el medio ambiente y a mantener la salud de los ecosistemas agrícolas a largo plazo. La conciencia y la gestión responsables del uso de herbicidas son fundamentales para equilibrar los beneficios agronómicos con la preservación del entorno natural. Barba (2019) indica que las moléculas de herbicidas, debido a su movilidad y persistencia, tienen el potencial de afectar adversamente tanto la calidad del suelo como la de las aguas superficiales o subterráneas. Es crucial tener en cuenta que la movilidad de los herbicidas desde la superficie del suelo conlleva la disminución en la duración del control residual sobre las malas hierbas. Este fenómeno puede dar lugar a contaminaciones en las aguas subterráneas, como se ha observado en sistemas agrícolas de varios países. Por lo tanto, es necesario abordar de manera cuidadosa y equilibrada el uso de herbicidas en la agricultura para minimizar los impactos negativos en el medio ambiente (Barba, 2019).

2.3.2. Herbicidas

Barba (2019), nos menciona que los herbicidas son sustancias químicas formuladas con el propósito específico de inhibir o prevenir el crecimiento de plantas no deseadas, comúnmente conocidas como malas hierbas, en los campos de cultivo. Estos compuestos desempeñan un papel crucial en la agricultura moderna al proporcionar a los agricultores una herramienta efectiva para el control de malezas, mejorando así la productividad y el rendimiento de los cultivos. La función principal de los herbicidas radica en su capacidad para interferir con procesos metabólicos esenciales en las plantas no objetivo, como la fotosíntesis, la división celular o la síntesis de proteínas. Al hacerlo, se logra inhibir el crecimiento y desarrollo de las malas hierbas, permitiendo que los cultivos seleccionados prosperen sin la competencia por nutrientes, luz y espacio (Barba, 2019). El uso de herbicidas ofrece varias ventajas en la agricultura, incluida la eficiencia en la gestión

del cultivo, la reducción de la necesidad de labranza intensiva y la conservación del agua al minimizar la competencia de las malas hierbas por este recurso vital. Asimismo, contribuye a mantener la calidad de los productos agrícolas al prevenir la contaminación por malas hierbas. A pesar de sus beneficios, el uso de herbicidas también ha generado preocupaciones ambientales. La aplicación excesiva o incorrecta puede dar lugar a la contaminación del suelo, el agua y el aire, afectando a los ecosistemas circundantes y a la biodiversidad. Además, la resistencia de las malas hierbas a ciertos herbicidas es un desafío en aumento que requiere una gestión cuidadosa y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles. En última instancia, el uso de herbicidas en la agricultura implica un equilibrio entre la necesidad de controlar las malas hierbas para asegurar la productividad y los posibles impactos ambientales. La investigación continua y la implementación de prácticas agrícolas responsables son esenciales para maximizar los beneficios de los herbicidas mientras se minimizan los riesgos asociados con su uso.

2.3.2.1. Itasato

Es un herbicida específico, indicando que se trata de una sustancia sistémica, no selectiva y aplicada después de la emergencia de las plantas, este herbicida se absorbe a través de las hojas y se desplaza por el floema, distribuyéndose por toda la planta, su mecanismo de acción se centra en afectar la actividad enzimática relacionada con la formación de aminoácidos aromáticos esenciales y otros productos químicos importantes, como lignina, fenoles y ácido indolacético; este proceso conduce al amarillamiento gradual de las hojas, seguido de su marchitamiento y, finalmente, la muerte de las malezas (Barba, 2019).

2.3.2.2. Devastor

El Glifosato, comercializado bajo el nombre de Devastor, es un herbicida de acción sistémica ampliamente utilizado en la agricultura para el control efectivo de malezas. Su eficacia y versatilidad lo han convertido en uno de los herbicidas más populares en todo el mundo. La acción sistémica del Glifosato significa que se absorbe a través de las hojas y se transporta dentro de la planta, llegando a tejidos y estructuras vitales, incluso las raíces. Este método de acción contribuye a su capacidad para eliminar eficientemente las malas hierbas al afectar múltiples procesos fisiológicos en las plantas no deseadas. El Devastor interrumpe la vía del shikimato, un proceso metabólico fundamental en las plantas que es esencial para la síntesis de aminoácidos aromáticos. Al inhibir esta

vía, el herbicida bloquea la producción de compuestos esenciales para el crecimiento de la planta, llevando a su deterioro y eventual muerte. La popularidad del Glifosato se atribuye a su eficacia frente a una amplia variedad de malezas y su aplicación en diversos cultivos. Sin embargo, su uso también ha generado debates en relación con posibles impactos ambientales y la evolución de resistencia en algunas especies de malezas. Es crucial abordar el uso del Glifosato con prácticas agrícolas responsables, como la rotación de cultivos y la combinación con otras estrategias de manejo integrado de plagas, para minimizar la presión de selección de resistencia y reducir los posibles impactos ambientales. La gestión cuidadosa de este herbicida asegura que continúe siendo una herramienta valiosa para el control de malezas mientras se minimizan los riesgos asociados con su aplicación proteínas necesarias en la planta, afectando así la capacidad de generar nuevos tejidos (Barba, 2019).

2.3.2.3. Iguana

El herbicida IGUANA actúa de manera instantánea afectando los cloroplastos, específicamente en el fotosistema I, donde genera electrones libres esenciales para el proceso fotosintético (Barba, 2019). Estos electrones reaccionan con el ion IGUANA, convirtiéndolo en un radical libre. Bajo la influencia del oxígeno, este radical libre se transforma en superóxidos (O_2^-), los cuales causan una rápida desintegración de las membranas y tejidos celulares de las plantas. La acción herbicida de IGUANA requiere la presencia de luz para desencadenarse. Es un herbicida de contacto no selectivo diseñado para el control de malezas anuales y perennes, provocando daños graves o secado intenso en toda la vegetación verde con la que entra en contacto. En condiciones de baja intensidad lumínica o ausencia de luz durante la aplicación, IGUANA puede, en cierta medida, ser translocado por la planta. Sin embargo, al entrar en contacto con el suelo, se inactiva de manera rápida y biológica al adsorberse a los minerales, quedando inmovilizado y no disponible para la absorción por las raíces. La penetración eficiente en las malezas por parte del IGUANA evita el riesgo de ser arrastrado, incluso si la lluvia ocurre poco después de la aplicación, en un intervalo de 15 a 30 minutos (Barba, 2019).

2.3.3. Categoría toxicológica

Se La categoría toxicológica en la clasificación de pesticidas es esencial para evaluar y comunicar el grado de peligrosidad o toxicidad aguda de estos productos químicos. Esta categorización proporciona información crucial para garantizar

el uso seguro y adecuado de pesticidas en entornos agrícolas y otros contextos. La clasificación toxicológica se basa en la evaluación de los efectos agudos de los pesticidas en la salud humana y animal. Se utiliza para comunicar de manera clara y comprensible la peligrosidad de un producto y guiar a los usuarios sobre las precauciones necesarias durante la manipulación, aplicación y almacenamiento.

Según (Gonzales, 2019) la escala de categorías toxicológicas generalmente varía de I a IV, donde:

Categoría I: Pesticidas extremadamente tóxicos o altamente peligrosos. Pueden representar riesgos significativos incluso en pequeñas cantidades y requieren precauciones extremas en su manejo.

Categoría II: Pesticidas altamente tóxicos. Aunque menos peligrosos que los de la Categoría I, aún requieren precauciones sustanciales y una gestión cuidadosa.

Categoría III: Pesticidas moderadamente tóxicos. Representan un riesgo menor pero aún requieren precauciones y prácticas seguras.

Categoría IV: Pesticidas ligeramente tóxicos o de baja toxicidad. Aunque representan el menor riesgo agudo, aún se deben seguir prácticas seguras.

La clasificación toxicológica se determina mediante estudios de laboratorio y evaluaciones de riesgo que consideran la toxicidad aguda, la frecuencia de exposición y la vía de exposición (contacto dérmico, inhalación o ingestión). Es fundamental que los usuarios de pesticidas comprendan y respeten la categoría toxicológica asignada a cada producto. Esta información ayuda a minimizar los riesgos para la salud humana, animal y el medio ambiente, promoviendo así un uso responsable y sostenible de los pesticidas en la agricultura y otras aplicaciones (Gonzales, 2019).

2.3.4. Formulación química de los herbicidas

Viveros (2014) nos menciona que para saber las formulaciones químicas de las herbicidas en primer lugar se basa a las clasificaciones de acuerdo a su naturaleza química son las siguientes:

2.3.4.1. Herbicidas Finoxiacéticos

Los ácidos 2,4-dicloro-fenoxiacético (2,4-d) y 2,4,5-tricloro-fenoxiacético (2,4,5-T) son herbicidas que pertenecen a este grupo y han sido ampliamente utilizados en diversos países. Normalmente, se aplican en forma de ésteres,

amidas o sales para mejorar su eficacia como herbicidas. Estos compuestos han tenido una larga historia de uso en el control de malezas en diferentes regiones del mundo (Viveros, 2014).

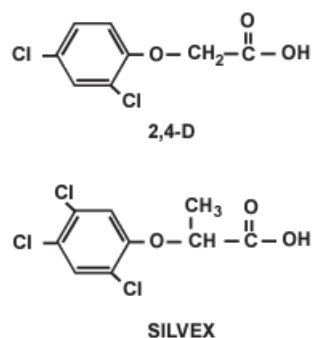


Figura 2. Composición química de los herbicidas Finoxiacéticos.

2.3.4.2. Herbicidas Triazínicos

Según su composición química, los herbicidas triazínicos se dividen en tres categorías: (a) los halogenados, ejemplificados por Simazina y Triazina, (b) los metoxilados, representados por Prometón y Atratól, y (c) los tiometilados, como Simetrina y Ametrina. En términos generales, Simazina y Atrazina son los compuestos más comúnmente empleados dentro de este grupo (Viveros, 2014).

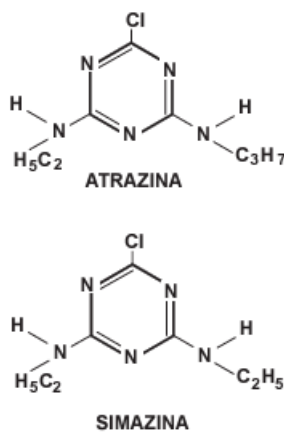


Figura 3. Composición química de los herbicidas Triazínicos.

2.3.4.3. Herbicidas Bipiridílicos

Los herbicidas de contacto, Paraquat y Diquat, son considerados entre los herbicidas heterocíclicos más relevantes y ampliamente utilizados en la actualidad. La efectividad de los compuestos bipiridílicos como herbicidas depende de factores esenciales como la presencia de luz, oxígeno y clorofila. La acción herbicida de

estos se atribuye a su capacidad para formar radicales libres estables y solubles en agua, los cuales, al reoxidarse en la planta, generan peróxidos altamente tóxicos para los tejidos vegetales (Viveros, 2014).

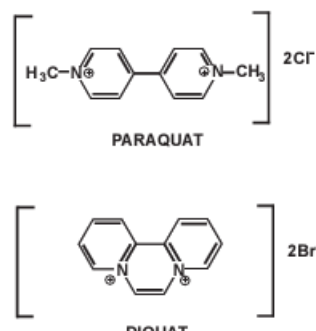


Figura 4. Composición química de los herbicidas Bipyridílicos.

2.3.4.4. Herbicidas Grifosatos

Hay un total de 35 productos comerciales registrados que contienen glifosato como ingrediente activo. La mayoría de estos productos incorporan otros compuestos adicionales, como surfactantes e isopropilamina, con el objetivo de aumentar la efectividad del producto, pero también contribuyen a una mayor toxicidad en general (Viveros, 2014).

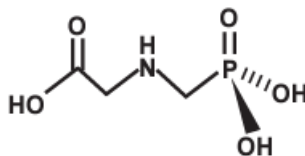


Figura 5. Composición química de los herbicidas Glifosatos.

2.3.4.5. Herbicidas Propanilos

El Propanilo, también conocido como 3', 4'-dicloropropioanilida, es un herbicida selectivo que se utiliza en la fase post-emergencia. Su acción se limita al contacto con las plantas y tiene un amplio espectro, siendo eficaz contra hierbas de hoja ancha y malas hierbas. Este herbicida es comúnmente empleado en arrozales para el control de malezas en este tipo de cultivos (Viveros, 2014).

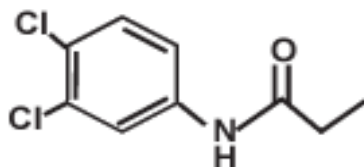


Figura 6. Composición química de los herbicidas Propanilos.

2.3.4.6. Herbicidas Derivados De Lo Urea

Dentro de este grupo de herbicidas, se encuentran más de veinte compuestos de uso comercial, siendo los más reconocidos y empleados el Diurón, Monurón, Linurón y Fluometuron. Estos herbicidas tienen aplicaciones diversas en la agricultura y son ampliamente utilizados en prácticas de control de malezas (Viveros, 2014).

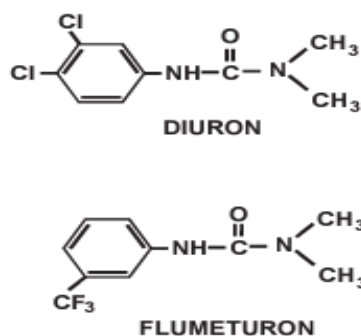


Figura 7. Composición química de los herbicidas derivados de la Urea.

2.3.4.7. Otros herbicidas

Debido a la diversidad a la diversidad de La acción herbicida implica la utilización de diversos grupos químicos y estructuras que interfieren con los procesos metabólicos de las plantas no deseadas, lo que lleva a su control y eliminación. Aunque no es posible abordar en detalle todos estos grupos, es relevante señalar que ciertos herbicidas, como el Dinoseb, han generado preocupaciones significativas (Viveros, 2014). El Dinoseb, un herbicida perteneciente al grupo de los nitrofenoles, fue prohibido en Estados Unidos en 1986 mediante una orden de emergencia. Esta decisión se basó en pruebas concluyentes sobre la capacidad del Dinoseb para causar defectos congénitos y su persistencia en los mantos freáticos. La prohibición fue una medida preventiva para salvaguardar la salud humana y el medio ambiente. La acción herbicida del Dinoseb estaba relacionada con su capacidad para interferir con los procesos metabólicos de las plantas, afectando su crecimiento y desarrollo. Sin embargo, su impacto negativo en la salud

humana y en los recursos hídricos llevó a la prohibición de su uso en Estados Unidos. Es relevante destacar que, además del Dinoseb, otros herbicidas vinculados al nitrofén también han sido objeto de prohibiciones en varios países. Estas prohibiciones se han implementado para abordar posibles riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con la exposición y la persistencia de estos compuestos químicos (Viveros, 2014). La gestión cuidadosa y la evaluación continua de los herbicidas son esenciales para garantizar un uso seguro y sostenible en la agricultura y otras aplicaciones. Las prohibiciones de sustancias como el Dinoseb subrayan la importancia de tomar medidas regulatorias cuando se identifican riesgos potenciales para la salud pública y el entorno natural (Viveros, 2014).

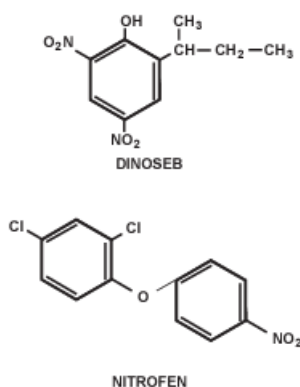


Figura 8. Composición química de otros herbicidas.

2.3.5. Estándar de calidad Ambiental para suelo

El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo en el Perú es un conjunto de valores establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) que define las concentraciones máximas permisibles de sustancias químicas presentes en el suelo. Su objetivo principal es preservar la calidad del suelo para diferentes usos, como agrícola, residencial, comercial e industrial, protegiendo la salud humana, el medio ambiente y los recursos naturales.

El ECA para suelo establece niveles de referencia que permiten evaluar la condición de los suelos frente a posibles contaminaciones por sustancias químicas, incluyendo metales pesados como el cadmio, el plomo y otros. Estos valores varían según el tipo de uso del suelo, ya que cada categoría tiene requisitos específicos:

Uso agrícola: Orientado a suelos destinados al cultivo de alimentos, buscando garantizar su productividad y prevenir riesgos para la salud humana y animal.

Uso residencial y parques: Enfocado en áreas habitadas y espacios públicos, priorizando la seguridad de las personas.

Uso comercial e industrial: Establecido para suelos dedicados a actividades económicas, considerando la exposición ocupacional.

Estos estándares son herramientas claves en la gestión ambiental, ya que sirven para la identificación de áreas contaminadas, la planificación de remediación de suelos y el control de impactos ambientales derivados de actividades humanas, como la minería, la agricultura intensiva o el desarrollo urbano.

Tabla 1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

Parámetro	Suelo Agrícola	Suelo Residencial/Parques	Suelo Comercial/Industrial	Métodos de Ensayo
Cadmio (Cd)	1,4 mg/kg	10 mg/kg	22 mg/kg	EPA 3050 / EPA 3051
Plomo (Pb)	70 mg/kg	140 mg/kg	800 mg/kg	EPA 3050 / EPA 3051
Arsénico (As)	50 mg/kg	50 mg/kg	140 mg/kg	EPA 3050 / EPA 3051
Mercurio (Hg)	6,6 mg/kg	6,6 mg/kg	24 mg/kg	EPA 7471 / EPA 6020
Cromo Total (Cr)	400 mg/kg	400 mg/kg	1,000 mg/kg	EPA 3050 / EPA 3051
Cromo VI (Cr VI)	0,4 mg/kg	0,4 mg/kg	1,4 mg/kg	EPA 3060 / EPA 7199
Bario Total (Ba)	750 mg/kg	500 mg/kg	2,000 mg/kg	EPA 3050 / EPA 3051

Fuente: Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM

Esta tabla contiene todos los parámetros químicos inorgánicos del ECA para suelos agrícolas, residenciales y comerciales/industriales, incluyendo sus métodos de ensayo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Esta investigación se realizó en el caserío Villa Rica que está ubicado en el distrito de Santo Domingo de Anda provincia de Leoncio Prado, Huánuco

1.1.1. Ubicación política de la zona de estudio.

Caserío : Villa Rica
Distrito : Santo Domingo de Anda
Provincia : Leoncio Prado
Departamento : Huánuco

1.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

Este : 8997993
Norte : 383988
Altitud : 920 msnm

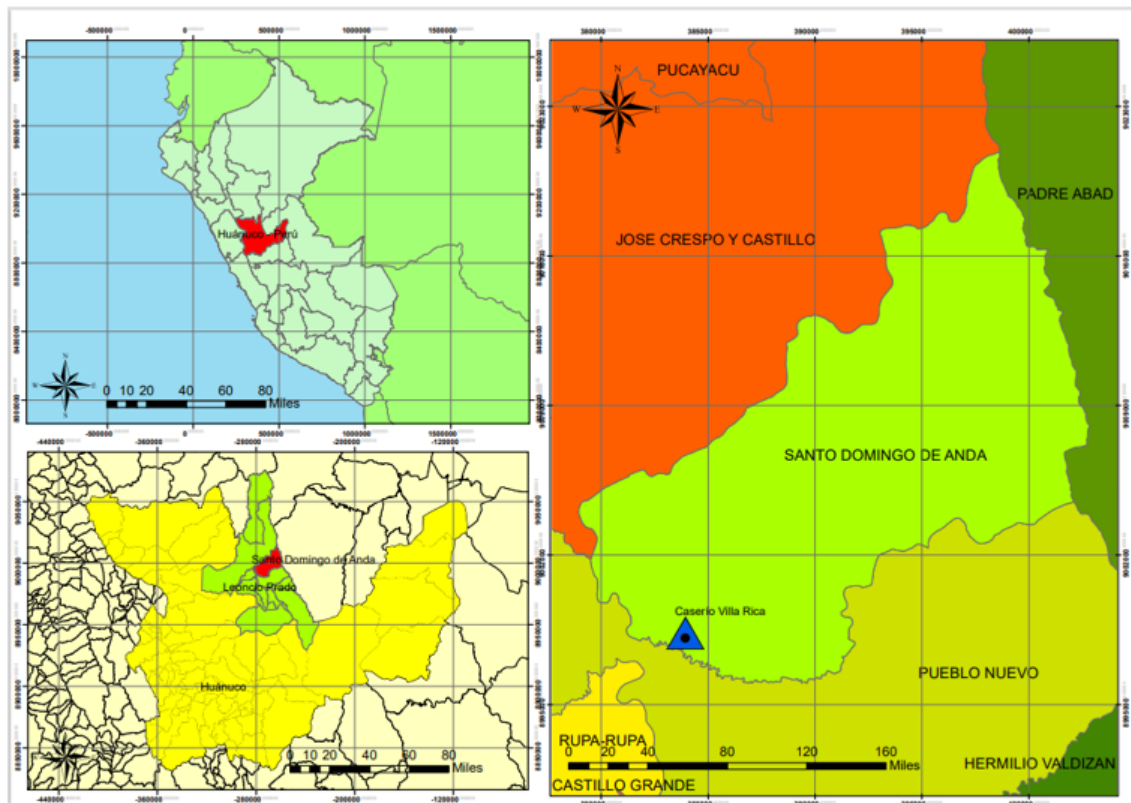


Figura 9. Ubicación, política, de la zona, de estudio.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales de campo

Los materiales que fueron utilizados en campo son los siguientes: muestreador de suelo, libreta de campo, machete, Wincha, Pala, Botas, Rafia, bolsas para recolectar muestras, lapicero y etiquetas

3.2.2. Materiales de gabinete

Para delimitar la zona de estudio en el caserío Villa Rica se utilizó la Carta geológica nacional del instituto geográfica nacional (IGN).

3.2.3. Equipos

Los equipos de muestreo utilizados son GPS GARMIN 62 S, cámara digital, moto lineal para el transporte.

3.2.4. Softwares usados

Los softwares que se utilizó para el procesamiento de datos y redacción del informe de esta investigación son: Microsoft Word, Microsoft Excel y ArcGIS 10.3

3.3. Criterios de investigación

3.3.1. Nivel de investigación

El nivel de investigación utilizado para esta investigación es el nivel relacional. Este enfoque implica analizar las posibles conexiones, asociaciones o correlaciones entre el uso de herbicidas y la presencia de metales traza en los suelos del cultivo de *Teobroma cacao L.* La investigación se centra en establecer relaciones y comprender cómo la aplicación de herbicidas podría estar vinculada a la presencia de metales traza en los cultivos, proporcionando así información detallada sobre la interacción entre estas variables en el caserío de Villa Rica.

3.3.2. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada, la elección de este tipo de investigación se debe a que se busca aplicar los conocimientos provenientes de las ciencias básicas de la química para abordar un problema específico y práctico: la relación entre el uso de herbicidas y la presencia de metales traza en los cultivos de cacao en el caserío de Villa Rica – Leoncio Prado. Al recurrir a las ciencias básicas, en este caso, la química se

pretende determinar y comprender los efectos de los herbicidas en relación con los metales traza.

3.3.3. Método de investigación

El método de investigación es experimental, ya que implica la manipulación activa de variables independientes (aplicación de herbicidas) para observar sus efectos en las variables dependientes (presencia de metales traza y parámetros físicos y químicos del suelo). Este enfoque permite establecer relaciones de causalidad y cuantificar el impacto de los herbicidas sobre la calidad del suelo en el cultivo de *Theobroma cacao L.* en el caserío Villa Rica, distrito de Leoncio Prado.

3.3.4. Operacionalización de variables

3.3.4.1. Variable asociada X

En este contexto, la variable "x uso de herbicidas" es una variable independiente que se investigó para analizar su posible relación e influencia en la concentración de metales traza en los cultivos de *Theobroma cacao L.* se seleccionaron tres tipos de herbicidas más utilizadas en el caserío Villa Rica, las cuales son, Itasato, Devastor e Iguana como cada una de estas herbicidas influye en la concentración de metales traza.

3.3.4.2. Variable de supervisión Y

La concentración de metales traza sería la variable dependiente que se ve afectada por el uso de herbicidas y que se busca medir y comprender en el estudio la concentración de 5 metales trazas que son el Zn, Mn, Cu, Cd y Pb.

Tabla 2. Operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicador
	El uso generalizado de herbicidas en la agricultura, aunque busca mejorar el rendimiento de los cultivos, plantea preocupaciones importantes sobre la	Itasato	Textura Densidad aparente pH Materia orgánica Nitrógeno Total Fosforo disponible

X: Uso de herbicidas	contaminación ambiental. Se destaca que las moléculas de herbicidas, al ser móviles y persistentes, pueden impactar negativamente la calidad del suelo y de las aguas superficiales o subterráneas (Barba, 2019).	Devastor	Potasio Textura Densidad aparente pH Materia orgánica Nitrógeno Total Fosforo disponible Potasio Textura Densidad aparente pH
		Iguana	Materia orgánica Nitrógeno Total Fosforo disponible Potasio
Y: Metales traza	Los metales traza son elementos presentes en el ambiente en concentraciones bajas, a menudo inferiores a mil partes por millón. Algunos tienen funciones esenciales como micronutrientes, mientras que otros son tóxicos y carecen de un papel biológico (Veda, 2021).	Cd	Concentración de Cadmio (Cd)
		Mn	Concentración de Manganeso (Mn)
		Plomo	Concentración de Plomo (Pb)
		Cu	Concentración de Cobre Cu)
		Zn	Concentración de Zinc (Zn)

3.3.5. Diseño de investigación

La presente investigación se caracteriza por adoptar un diseño cuasi experimental, específicamente de tipo causal, con una categoría transversal-causal. Este diseño implica la recopilación de muestras de suelo representativas del área de estudio, identificadas como [1, 2, 3...n].

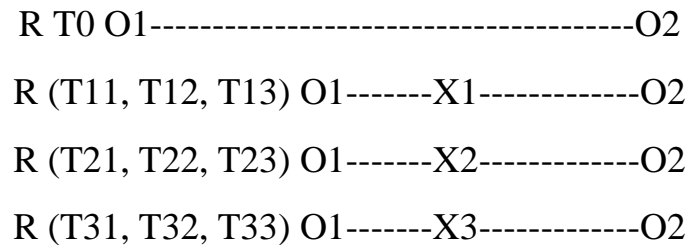


Figura 10. Diseño cuasi experimental de la investigación.

Donde:

R: no aleatorio.

T0: Grupo de control o Testigo(T0).

(T11...T33):. Grupo experimental, tres tratamientos con tres repeticiones cada una.

O1: Pre test.

O2: Post test.

X1: tratamiento con herbicida devastor.

X2: tratamiento con herbicida Itasato

X3: tratamiento con herbicida Iguana.

3.3.6. Población y muestra

La población considerada para esta investigación está constituida por los suelos agrícolas del caserío Villa Rica, utilizados para el cultivo de *Theobroma cacao L.* en parcelas donde se aplican regularmente herbicidas como Itasato, Devastor e Iguana. Estos suelos representan un entorno característico de las zonas agrícolas amazónicas, con características fisicoquímicas influenciadas por el manejo agrícola y el uso intensivo de agroquímicos. Se utilizaron parcelas divididas en 10 partes: una como testigo (T0) y nueve con diferentes tratamientos (T11, T12, T13 para Devastor; T21, T22, T23 para Itasato; y T31, T32, T33 para Iguana). Las muestras de suelo fueron recolectadas a una profundidad estándar de 0-30 cm, adecuada para evaluar parámetros fisicoquímicos y concentraciones de metales traza, utilizando técnicas estandarizadas de muestreo y análisis en laboratorio.

3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de muestras de suelo se llevó a cabo mediante un diseño estratificado por tratamiento (antes y después de la aplicación de herbicidas). El procedimiento incluyó la identificación y marcaje de las parcelas experimentales (T0, T11-T33), la extracción de muestras compuestas de suelo por parcela a una profundidad de 0-30 cm, la homogeneización de las muestras y su almacenamiento en bolsas plásticas estériles. Las muestras fueron etiquetadas y conservadas bajo condiciones controladas hasta su análisis en laboratorio.

Para el análisis de laboratorio, se utilizaron procedimientos analíticos enfocados en evaluar parámetros físicos, químicos y la concentración de metales traza en el suelo. Los parámetros físicos evaluados incluyeron textura y densidad aparente, mientras que los parámetros químicos considerados fueron el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el contenido de materia orgánica. Los metales traza analizados incluyeron cadmio (Cd), manganeso (Mn), plomo (Pb), cobre (Cu) y zinc (Zn).

La observación sistemática se realizó mediante el registro de condiciones de las parcelas experimentales durante y después de la aplicación de los herbicidas. Este proceso incluyó la documentación visual de los cambios en las parcelas mediante fotos, así como el registro de datos relevantes en fichas de observación, tales como vegetación afectada, infiltración de agua y cambios visibles en el suelo.

En el campo, los instrumentos utilizados incluyeron muestreador y palas para la extracción de muestras de suelo, bolsas estériles y etiquetas para su almacenamiento, cámaras fotográficas o dispositivos móviles para el registro visual y fichas de observación para recopilar información contextual.

Para la gestión de datos, se utilizaron herramientas como software estadístico (Excel) para realizar los análisis correspondientes, así como hojas de cálculo para el registro y organización preliminar de los datos obtenidos.

3.3.8. Análisis de datos

Mediante el programa Microsoft Excel y Word se realizaron los análisis de los datos recolectados en el laboratorio, para el análisis comparativo implicó la comparación de datos obtenidos antes y después de la aplicación de herbicidas. Los resultados analíticos fueron consolidados en una base de datos, y se aplicaron análisis

estadísticos, la prueba de normalidad, para determinar diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo.

3.4. Metodología

3.4.1. Identificación del área de estudio

Se llevó a cabo una visita previa al caserío Villa Rica con el propósito de identificar las áreas de muestreo en zonas de cultivo. Se realizó un estudio en el caserío Villa Rica, caracterizado por la predominancia de cultivos de *Theobroma cacao* L., con el objetivo de evaluar el impacto de diferentes herbicidas en las propiedades fisicoquímicas del suelo y en la concentración de metales traza. Para esta investigación, se seleccionaron suelos agrícolas de 10 parcelas, cada una con un aproximado de 1000 metros cuadrados, distribuidas en tres grupos experimentales con tres repeticiones cada uno y un testigo. Las parcelas se organizaron de la siguiente manera: T0 (testigo), T11, T12 y T13 (tratadas con el herbicida Devastor), T21, T22 y T23 (tratadas con Itasato), y T31, T32 y T33 (tratadas con Iguana). Las parcelas testigo (T0) no recibieron ningún tratamiento químico, mientras que las demás fueron sometidas a la aplicación de los herbicidas mencionados.

T0	T31	T32	T33	T21	T22	T23	T11	T12	T13
----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 11. Parcelas del estudio.

3.4.2. Recolección de las muestra y aplicación del tratamiento.

Inicialmente, se recolectaron muestras de suelo con un muestreador, en cada una de las parcelas antes de la aplicación de los herbicidas para establecer las condiciones iniciales. Posteriormente, los herbicidas Devastor, Itasato e Iguana se aplicaron a una dosis de 20 ml por cada 20 litros de agua. La aplicación se realizó

utilizando una fumigadora tipo moto bomba para asegurar una distribución homogénea en cada parcela tratada. En cada parcela, se aplicaron dos bombas de mochila fumigadora, lo que representó un total de 18 bombas para cubrir todas las parcelas tratadas. La parcela testigo (T0) no recibió ningún tipo de herbicida, sirviendo como control del experimento.

Veinte días después de la aplicación de los herbicidas, se observaron los efectos sobre las parcelas tratadas, siendo evidente la eliminación de malezas en estas. Durante este período, también se recolectaron nuevamente muestras de suelo de cada parcela, las cuales fueron cuidadosamente almacenadas en condiciones controladas para su posterior análisis en laboratorio.

3.4.3. Análisis de parámetros fisicoquímicos del suelo

Se procedió a trasladar la muestra al laboratorio de suelos de la UNAS para realizar sus respectivos análisis de parámetros fisicoquímicos. En el laboratorio, se realizaron evaluaciones detalladas de los; parámetros Físicos (Arena (%), Arcilla (%), Limo (%), y la Clase Textural del suelo) y Parámetros Químicos (Conductividad Eléctrica (CE, dS/m), pH (1:1), Materia Orgánica (M.O., %), Nitrógeno Total (N, %), Carbono Orgánico (C, %), Fósforo (P, ppm), Potasio como Óxido (K_2O , ppm), Hierro (Fe, ppm), , Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), y cationes intercambiables como Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na) en unidades de $Cmol(+)/kg.$). Los análisis comparativos entre las muestras tomadas antes y después de la aplicación de los herbicidas permitieron determinar los cambios inducidos por cada uno de los tratamientos. Además, se evaluó la persistencia de residuos de herbicidas en el suelo y su posible acumulación en los sistemas agrícolas.

3.4.4. Determinación de las concentraciones de metales traza (Cadmio, Manganeso, Plomo, Cobre, y Zinc)

Para el análisis de laboratorio, se utilizaron procedimientos analíticos enfocados en evaluar parámetros físicos, químicos y la concentración de metales traza en el suelo mencionados en las metodologías utilizadas por el laboratorio de análisis de suelos, agua y ecotoxicología de la UNAS. Los parámetros físicos evaluados incluyeron textura y densidad aparente, mientras que los parámetros químicos considerados fueron el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el contenido de materia orgánica. Los

metales traza analizados incluyeron Zinc (Zn, ppm), Manganeseo (Mn, ppm), Cobre (Cu, ppm), Cadmio (Cd, ppm), Plomo (Pb, ppm).

3.4.5. La relación entre el uso de herbicidas y los metales traza Cadmio, Manganeseo, Plomo, Cobre, y Zinc en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L*

Para la relación entre las herbicidas y metales traza, se utilizó los resultados de análisis de las muestras para cada metal y cada muestra del suelo con sus respectivos parámetros seleccionados; y se procesaron los datos en el Microsoft Excel para realizar las respectivas interpretaciones y se realizó la prueba de correlación de Pearson y la prueba de normalidad (Tabla. 31).

3.4.6. Evaluación del cumplimiento con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas.

Teniendo los resultados de los análisis de los parámetros y metales traza se identificó que el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelos solo se encuentran el Cd y Pb, de nuestros análisis realizados y se procedió a comparar.

Tabla 3. Los ECA para suelos agrícolas

Parámetro	ECA para suelos agrícolas	Método de análisis recomendado
Cadmio (Cd)	1,4	EPA 3050/3051
Plomo (Pb)	70	EPA 3050/3051

Fuente: Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. La relación entre el uso de herbicidas y los parámetros físicos en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L.*

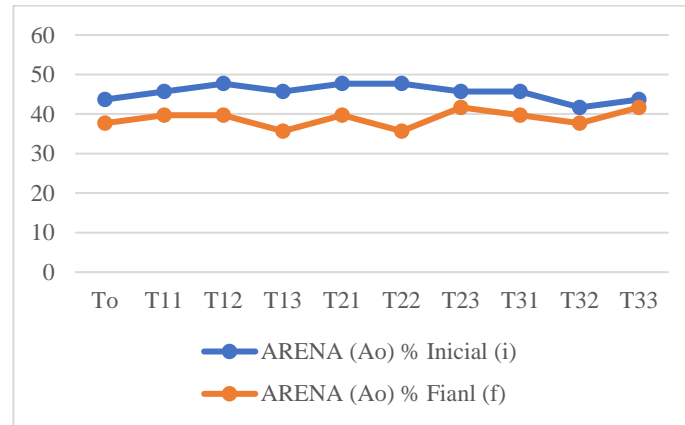


Figura 12. Comparación inicial y final de resultado del porcentaje de arena.

La Figura 12 muestra los valores iniciales y finales del porcentaje de arena en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas, así como el testigo (To) que no fue tratado. Comportamiento del Testigo (To), que no fue tratado con herbicidas, mostró una disminución del porcentaje de arena del 43.68% al 37.68%. Esto indica que, incluso en ausencia de herbicidas, existen procesos naturales, como lixiviación o compactación del suelo, que pueden reducir el porcentaje de arena. Este cambio puede estar asociado a factores ambientales o al manejo agrícola normal del suelo.

Tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13); T11, presentó una disminución del porcentaje de arena de 45.68% a 39.68%, similar a la tendencia del testigo. T12, inicialmente tuvo un porcentaje de arena más alto (47,68%) y también disminuyó a 39,68%. T13, registró una reducción significativa del porcentaje de arena de 45.68% a 35.68%, mostrando un mayor impacto que en T11 y T12. El herbicida Devastor parece haber intensificado el descenso del porcentaje de arena en T13 respecto al testigo y los otros tratamientos del mismo grupo. Esto podría deberse a una interacción del herbicida con el suelo que favorezca procesos de pérdida o redistribución de partículas arenosas, posiblemente por cambios en la estructura del suelo.

Tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23); T21 y T22, Ambos iniciaron con el mismo porcentaje de arena (47.68%) pero tuvieron una disminución diferente. T21, descendió a 39.68%, mientras que T22 bajó más significativamente a 35.68%. T23, este

tratamiento mostró una variación menos pronunciada, reduciéndose de 45.68% a 41.68%. Aunque todos los tratamientos con Itasato muestran una reducción, el impacto parece ser mayor en T22. Esto podría estar relacionado con una mayor sensibilidad del suelo a la interacción con el herbicida en esa muestra específica, o con factores como variabilidad en la aplicación o condiciones locales del suelo.

Tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33); T31 y T32, ambos tratamientos comenzaron con porcentajes iniciales distintos (45,68% y 41,68%) y terminaron con valores cercanos a los del testigo (39,68% y 37,68%). T33, mostró la menor variación, pasando de 43,68% a 41,68%, siendo el tratamiento que preservó mejor el porcentaje de arena. Iguana parece tener un impacto menor sobre el porcentaje de arena en comparación con los otros herbicidas, especialmente en T33, donde la variación fue casi imperceptible.

Comparación general de los herbicidas y el testigo, el porcentaje de arena disminuyó en todas las muestras, incluidas las del testigo, lo que sugiere que no solo los herbicidas, sino también otros factores como el manejo agrícola, podrían estar influyendo. Devastor e Itasato parecen tener un mayor impacto en la reducción del porcentaje de arena en ciertos tratamientos (T13 y T22, respectivamente), lo que sugiere que estos herbicidas podrían estar afectando la estabilidad de las partículas del suelo o alterando su estructura. Iguana, por otro lado, mostró un efecto menos pronunciado, particularmente en T33, donde la variación es mínima.

Reducción generalizada del porcentaje de arena, todos los tratamientos, incluyendo el testigo, mostraron una disminución del porcentaje de arena, lo que podría atribuirse tanto a la aplicación de herbicidas como a procesos naturales de alteraciones del suelo. Mayor impacto en ciertos tratamientos, los tratamientos T13 (Devastor) y T22 (Itasato) registraron las mayores disminuciones, lo que indica una interacción significativa entre estos herbicidas y las características específicas del suelo en esas muestras. Iguana como opción menos agresiva: Entre los herbicidas estudiados, Iguana parece ser el que menor impacto tiene en el porcentaje de arena, lo que podría señalarlo como una opción más favorable en términos de conservación de las propiedades físicas del suelo.

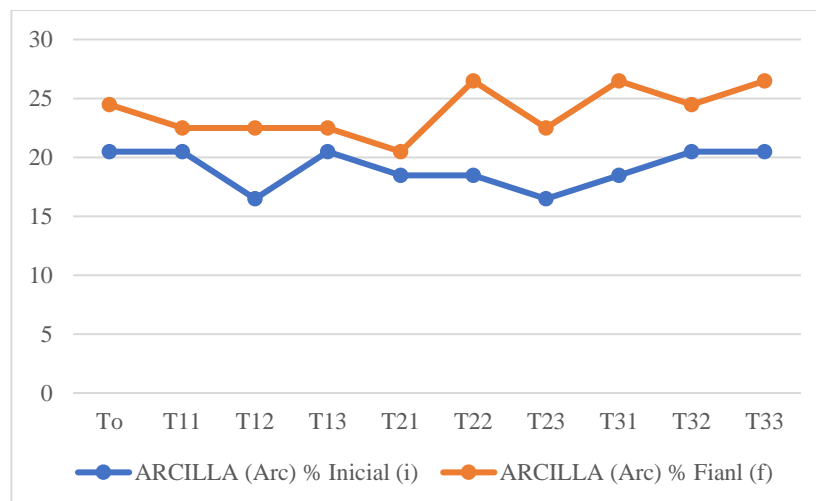


Figura 13. Comparación inicial y final de resultado de porcentaje de arcilla.

La Figura 13 muestra los valores iniciales y finales del porcentaje de arcilla en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. El comportamiento del Testigo (To), que no fue tratado con herbicidas, mostró un aumento del porcentaje de arcilla del 20.48% al 24.48%. Esto indica que, incluso en ausencia de herbicidas, existen procesos naturales, como redistribución de partículas finas, manejo agrícola o compactación, que pueden incrementar el porcentaje de arcilla en el suelo.

Tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13); T11, presentó un incremento moderado en el porcentaje de arcilla, pasando de 20.48% a 22.48%, un cambio similar al del testigo. T12, mostró un aumento más significativo, pasando de 16.48% a 22.48%, indicando una mayor sensibilidad del suelo en esta muestra al herbicida o a factores relacionados. T13, experimentó un incremento uniforme de 20.48% a 22.48%, comparable al de T11. El herbicida Devastor parece tener un impacto moderado y homogéneo en el porcentaje de arcilla, con variaciones similares entre las muestras tratadas.

Tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23); T21, mostró un aumento leve del 18.48% al 20.48%, siendo el menor cambio dentro de este grupo. T22, registró el mayor incremento, pasando de 18.48% a 26.48%, lo que sugiere un impacto significativo del herbicida en esta muestra. T23, aumentó de 16.48% a 22.48%, mostrando un cambio intermedio. El tratamiento T22 destaca por el aumento pronunciado en el porcentaje de arcilla, posiblemente relacionado con la interacción del herbicida con las propiedades locales del suelo en esta muestra.

Tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33); T31, registró un incremento significativo, de 18.48% a 26.48%, similar al de T22. T32, mostró un cambio moderado de 20.48% a 24.48%, comparable al comportamiento del testigo. T33, aumentó de 20,48% a 26,48%, siendo uno de los mayores incrementos observados. El herbicida Iguana mostró un impacto variable según la muestra, destacándose T31 y T33 con incrementos significativos, mientras que T32 tuvo un comportamiento más moderado.

Comparación general de los herbicidas y el testigo, todas las muestras, incluyendo el testigo, mostró un aumento en el porcentaje de arcilla, indicando que tanto los herbicidas como procesos naturales del suelo contribuyen a este cambio. Impacto destacado de Itasato e Iguana, estos herbicidas provocaron los mayores incrementos en ciertas muestras (T22, T31 y T33), sugiriendo una interacción más fuerte con las propiedades del suelo en esas áreas. Devastor con efectos moderados, este herbicida tuvo un impacto menos pronunciado y más homogéneo, lo que podría ser favorable para la conservación de las propiedades texturales del suelo.

En general, todos los tratamientos mostraron incrementos en el porcentaje de arcilla, lo que puede estar asociado a factores naturales, el manejo agrícola o la aplicación de herbicidas. Sin embargo, el impacto varió según el tipo de herbicida y las características del suelo, destacándose los mayores cambios en T22 (Itasato) y T31/T33 (Iguana), mientras que Devastor presentó efectos más moderados. Estos resultados sugieren la necesidad de un manejo adecuado de herbicidas para minimizar alteraciones en las propiedades físicas del suelo.

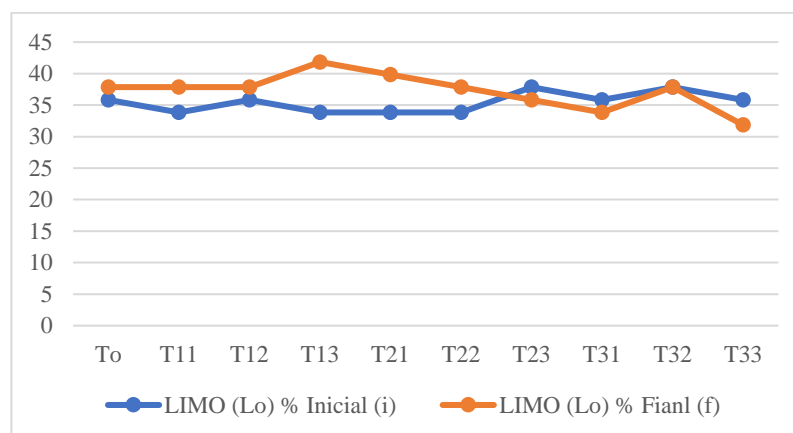


Figura 14. Comparación inicial y final de resultado del porcentaje limo.

La Figura 14 muestra los valores iniciales y finales del porcentaje de limo en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. Comportamiento del Testigo (To), que no fue tratado con herbicidas, mostró un aumento del porcentaje de limo de 35.84% a 37.84%. Este incremento indica que, incluso en ausencia de herbicidas, pueden ocurrir procesos naturales como la deposición de partículas finas o la redistribución de componentes del suelo, posiblemente influenciados por el manejo agrícola o las condiciones climáticas.

Tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13); T11, presentó un incremento en el porcentaje de limo de 33.84% a 37.84%, similar al comportamiento del testigo. T12, mostró un aumento idéntico, de 35.84% a 37.84%. Por otro lado, T13, registró un aumento más pronunciado, pasando de 33.84% a 41.84%, lo que sugiere un impacto más notable del herbicida Devastor en esta muestra. Estos resultados indican que, aunque Devastor tiende a aumentar el porcentaje de limo, el efecto puede variar según las características específicas del suelo tratado.

Tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23); T21, mostró un incremento del porcentaje de limo de 33.84% a 39.84%, destacándose dentro de este grupo. T22, aumentó de 33.84% a 37.84%, mostrando un comportamiento similar al del testigo. Sin embargo, T23, presentó una disminución, pasando de 37.84% a 35.84%, lo que contrasta con los otros tratamientos del mismo grupo. Este comportamiento sugiere una interacción diferenciada del herbicida Itasato con las propiedades del suelo en T23, posiblemente debido a condiciones locales específicas o variabilidad en la aplicación.

Tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33); T31, registró una disminución en el porcentaje de limo, pasando de 35.84% a 33.84%. T32, mantuvo valores constantes, con un porcentaje inicial y final de 37.84%, lo que indica estabilidad en esta muestra. T33, mostró la mayor reducción de este grupo, pasando de 35.84% a 31.84%. Estos resultados sugieren que el herbicida Iguana tiende a reducir el porcentaje de limo en el suelo, especialmente en T33, donde el impacto fue más significativo.

Comparación general de los herbicidas y el testigo, el porcentaje de limo mostró un comportamiento variable, con incrementos en algunos casos y disminuciones en otros, dependiendo del tratamiento y la muestra. Incrementos destacados en Devastor e Itasato, los tratamientos T13 (Devastor) y T21 (Itasato) presentaron los mayores aumentos en el porcentaje de limo, lo que indica una interacción más pronunciada de estos herbicidas con

las propiedades del suelo en dichas muestras. Iguana con tendencia a la reducción, los tratamientos con este herbicida, especialmente T31 y T33, registraron disminuciones en el porcentaje de limo, lo que podría estar relacionado con procesos de compactación o pérdida de partículas finas.

En general, los resultados muestran que el comportamiento del porcentaje de limo varía considerablemente según el herbicida aplicado y las características específicas del suelo. Mientras que algunos tratamientos, como T13 y T21, presentaron aumentos significativos, otros, como T33, mostraron reducciones notables. Estos hallazgos destacan la necesidad de evaluar cuidadosamente los efectos de los herbicidas sobre las propiedades físicas del suelo para garantizar prácticas agrícolas sostenibles y la conservación de su calidad.

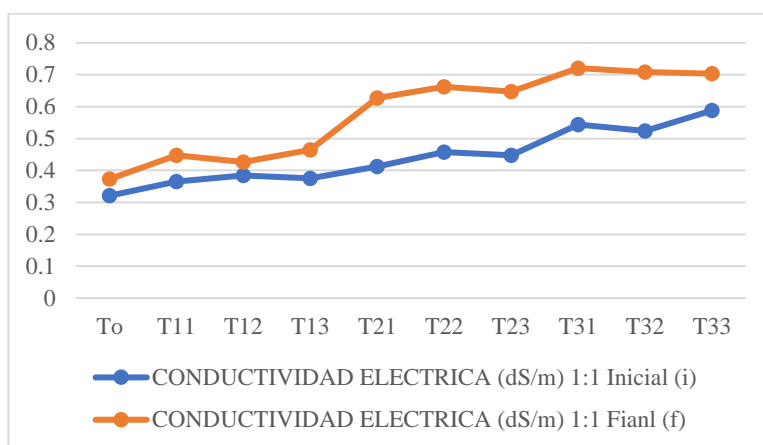


Figura 15. Comparación inicial y final de resultado de conductividad eléctrica.

La Figura 15 muestra los valores iniciales y finales de la conductividad eléctrica (CE) en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. El testigo presentó un aumento en la conductividad eléctrica de 0.321 dS/m a 0.373 dS/m. Este incremento, aunque leve, sugiere que pueden ocurrir cambios naturales en la conductividad del suelo, posiblemente relacionados con procesos de acumulación de sales por riego, lixiviación, o la dinámica de los nutrientes presentes.

En cuanto a los tratamientos con el herbicida Devastor, T11 mostró un aumento de la CE de 0.365 dS/m a 0.448 dS/m, lo que refleja un incremento moderado. T12 incrementó de 0.384 dS/m a 0.427 dS/m, presentando una variación menor que T11. Por su parte, T13 mostró el mayor aumento dentro de este grupo, de 0.375 dS/m a 0.465 dS/m, lo que indica un impacto más significativo del herbicida en este tratamiento. Estos resultados sugieren

que Devastor genera un aumento en la concentración de sales disueltas, aunque el efecto varía dependiendo de las condiciones del suelo tratado.

En los tratamientos con el herbicida Itasato, T21 presentó un aumento considerable, pasando de 0.412 dS/m a 0.627 dS/m. T22 registró un incremento similar, de 0.458 dS/m a 0.662 dS/m, siendo el valor más alto del grupo. T23 también mostró un incremento notable, de 0.448 dS/m a 0.647 dS/m. Estos resultados indican que Itasato tiene un efecto marcado en el aumento de la conductividad eléctrica del suelo, lo cual podría estar asociado a la liberación de compuestos salinos o a la alteración de los procesos de retención de sales en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana, T31 registró un aumento significativo de la CE, pasando de 0.544 dS/m a 0.721 dS/m. T32 mostró un incremento similar, de 0.524 dS/m a 0.709 dS/m. T33 presentó un aumento de 0.588 dS/m a 0.703 dS/m, siendo el tratamiento con el valor final más bajo dentro de este grupo. Estos resultados destacan que Iguana genera un impacto notable en la conductividad eléctrica, con valores finales superiores a los observados en los tratamientos con otros herbicidas, lo que sugiere una mayor acumulación de sales solubles en el suelo.

La conductividad eléctrica aumentó en todas las muestras, incluido el testigo, lo que indica que no solo los herbicidas, sino también otros factores, como el manejo del suelo y el riego, podrían estar influyendo. Itasato e Iguana generaron los incrementos más significativos en la CE, lo que podría estar relacionado con la composición química de estos herbicidas y su interacción con las sales del suelo. En términos de impacto por herbicida, Devastor presentó incrementos moderados, especialmente en T13, lo que sugiere una influencia variable dependiendo de las condiciones del suelo. Itasato generó aumentos más significativos en todos los tratamientos, destacándose T22 con el mayor incremento dentro de este grupo. Por último, Iguana produjo los valores finales más altos de CE, particularmente en T31, lo que evidencia un impacto fuerte sobre la acumulación de sales.

En general, el incremento generalizado de la conductividad eléctrica refleja una tendencia a la acumulación de sales disueltas en el suelo, posiblemente exacerbada por la aplicación de herbicidas. Iguana y Itasato parecen tener un efecto más marcado, lo que podría implicar riesgos para la calidad del suelo a largo plazo. Es necesario un manejo adecuado de estos herbicidas para minimizar impactos negativos en la salinidad del suelo.

4.2. La relación entre el uso de herbicidas y los parámetros químicos en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L.*

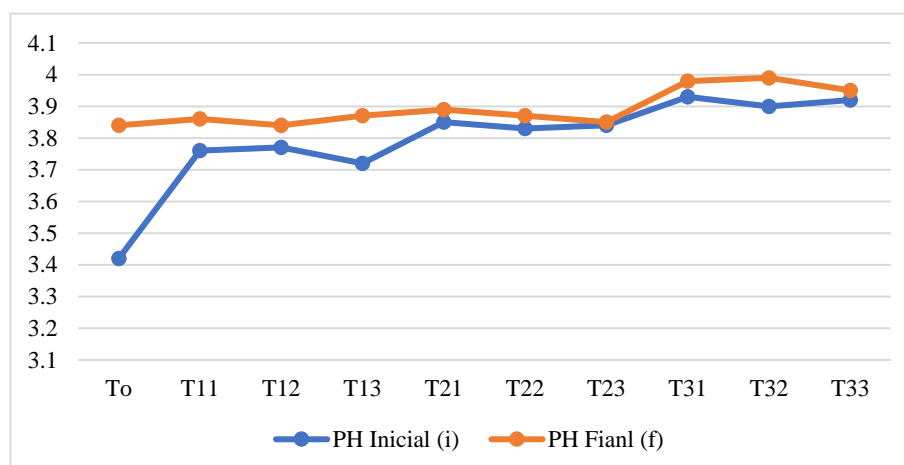


Figura 16. Comparación inicial y final de resultado de PH.

La Figura 16 muestra los valores iniciales y finales de pH en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. El testigo presentó un aumento en el pH del suelo, de 3.42 a 3.84. Este cambio puede reflejar procesos naturales que afectan la acidez del suelo, como la variabilidad en las lluvias, la actividad biológica o el manejo agrícola.

En cuanto a los tratamientos con el herbicida Devastor, T11 presentó un leve incremento en el pH, de 3.76 a 3.86, lo que sugiere una ligera alcalinización del suelo. T12 mostró un comportamiento similar, con un pequeño aumento de 3.77 a 3.84. T13, en comparación, registró el mayor incremento dentro de este grupo, pasando de 3.72 a 3.87, lo que indica un efecto más pronunciado del herbicida en este tratamiento. Los resultados sugieren que Devastor podría estar favoreciendo una ligera alcalinización del suelo, posiblemente debido a la interacción con la composición química del herbicida.

En los tratamientos con el herbicida Itasato, T21 mostró un aumento del pH de 3.85 a 3.89, T22 subió de 3.83 a 3.87, y T23 mostró una variación menor, de 3.84 a 3.85. Aunque el incremento en el pH fue menor en comparación con Devastor, los tratamientos con Itasato también reflejan un leve aumento de la alcalinidad del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana, los resultados mostraron un aumento progresivo del pH, con T31 pasando de 3.93 a 3.98, T32 de 3.90 a 3.99, y T33 de 3.92 a 3.95. Aunque los incrementos fueron moderados, los tratamientos con Iguana mostraron un efecto ligeramente mayor en comparación con los otros herbicidas, lo que podría sugerir una mayor capacidad de este herbicida para alterar la acidez del suelo.

En general, el pH aumentó en todas las muestras, incluyendo el testigo, lo que podría reflejar procesos naturales de alcalinización o la influencia de los herbicidas en el pH del suelo. Sin embargo, la magnitud de estos cambios fue pequeña, y aunque los efectos más significativos fueron observados con Devastor e Iguana, los cambios no fueron suficientemente grandes como para considerarse preocupantes en términos de acidificación del suelo. Este resultado indica que los herbicidas podrían estar favoreciendo una ligera alcalinización, lo que sugiere la necesidad de monitorear continuamente los cambios en el pH para evitar impactos negativos en el suelo.

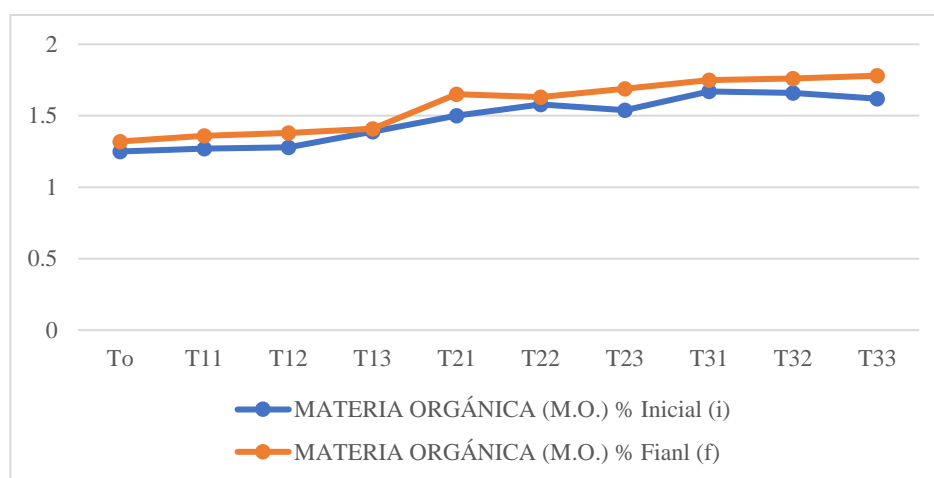


Figura 17. Comparación inicial y final de resultado de Materia orgánica.

La Figura 17 muestra los valores iniciales y finales de materia orgánica (M.O.) en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. El testigo (To) experimentó un ligero aumento en la materia orgánica, de 1.25% a 1.32%. Este incremento es característico de la dinámica natural del suelo, que puede estar influenciada por la actividad microbiana y el aporte de residuos orgánicos, además de las condiciones climáticas y el manejo agrícola.

En cuanto a los tratamientos con el herbicida Devastor, se observó un aumento moderado en la materia orgánica. T11 pasó de 1.27% a 1.36%, T12 aumentó de 1.28% a 1.38%, y T13 mostró un pequeño incremento de 1.39% a 1.41%. Aunque los aumentos en este grupo fueron modestos, sugieren que el herbicida Devastor no tuvo un impacto negativo significativo sobre la acumulación de materia orgánica en el suelo, e incluso puede haber favorecido una leve mejoría.

En los tratamientos con el herbicida Itasato, los valores de materia orgánica mostraron un incremento más pronunciado. T21 subió de 1.50% a 1.65%, T22 pasó de 1.58% a 1.63%, y T23 aumentó de 1.54% a 1.69%. Estos resultados sugieren que el

herbicida Itasato podría estar promoviendo un mayor enriquecimiento en materia orgánica en el suelo, lo cual puede estar asociado a una mejora en la actividad biológica y descomposición de la materia vegetal.

En los tratamientos con el herbicida Iguana, también se observó un aumento en la materia orgánica, con T31 pasando de 1.67% a 1.75%, T32 de 1.66% a 1.76%, y T33 de 1.62% a 1.78%. Aunque estos incrementos son menores en comparación con Itasato, muestran que Iguana también puede contribuir a la acumulación de materia orgánica en el suelo, aunque en menor medida que otros tratamientos.

En general, todos los tratamientos, incluyendo el testigo, mostraron un incremento en la materia orgánica, lo que sugiere que los herbicidas no tuvieron un efecto perjudicial en su contenido. De hecho, algunos de ellos, como Itasato, demostraron un mayor potencial para favorecer la acumulación de materia orgánica, lo cual es un indicio positivo para la fertilidad del suelo.

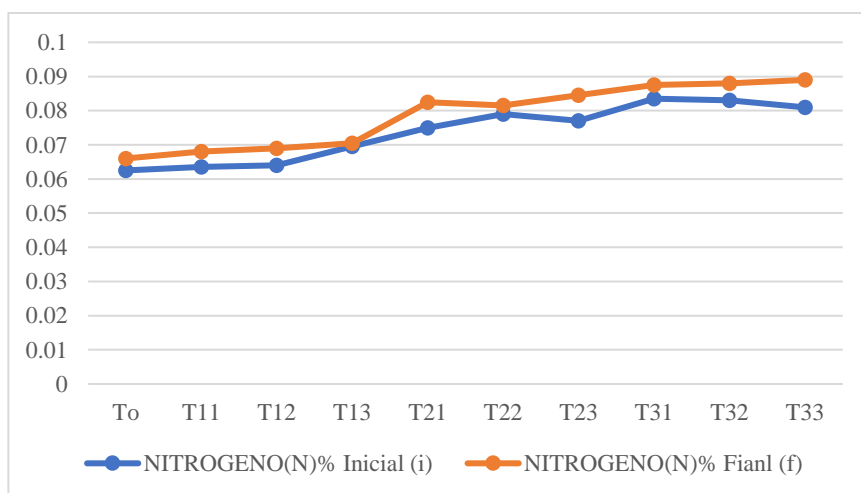


Figura 18. Comparación inicial y final de resultado de Nitrógeno.

La Figura 18 muestra los valores iniciales y finales del contenido de nitrógeno (N) en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un ligero aumento en el contenido de nitrógeno, pasando de 0.0625% a 0.066%. Este cambio es pequeño, pero indica una tendencia general de enriquecimiento en nitrógeno en el suelo, lo que puede ser resultado de procesos naturales como la mineralización de la materia orgánica o la actividad biológica del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor, se registraron aumentos similares en el nitrógeno. T11 aumentó de 0.0635% a 0.068%, T12 subió de 0.064% a 0.069%, y T13 mostró un leve incremento de 0.0695% a 0.0705%. Estos resultados sugieren que el

herbicida Devastor no tuvo un impacto negativo en el contenido de nitrógeno, aunque los incrementos no son muy pronunciados, lo que podría reflejar el equilibrio en la mineralización o la disponibilidad de nitrógeno en el suelo tratado.

En los tratamientos con el herbicida Itasato, se observó un aumento más significativo en el contenido de nitrógeno. T21 pasó de 0.075% a 0.0825%, T22 aumentó de 0.079% a 0.0815%, y T23 mostró el mayor incremento, pasando de 0.077% a 0.0845%. Estos resultados indican que el herbicida Itasato podría estar favoreciendo una mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo, posiblemente al mejorar la mineralización de la materia orgánica o a través de una mayor actividad microbiana.

En los tratamientos con el herbicida Iguana, también se observó un aumento en el nitrógeno, con T31 subiendo de 0.0835% a 0.0875%, T32 de 0.083% a 0.088%, y T33 de 0.081% a 0.089%. Al igual que en los tratamientos con Itasato, Iguana mostró un incremento notable en el nitrógeno, indicando que este herbicida también podría estar favoreciendo la disponibilidad de este nutriente.

En general, todos los tratamientos, incluidos el testigo, mostraron un aumento en el contenido de nitrógeno, lo que sugiere que los herbicidas no han afectado negativamente la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. De hecho, en algunos casos, como con Itasato e Iguana, los herbicidas parecen haber favorecido un mayor enriquecimiento de nitrógeno, lo cual podría ser beneficioso para la fertilidad del suelo y el crecimiento de los cultivos.

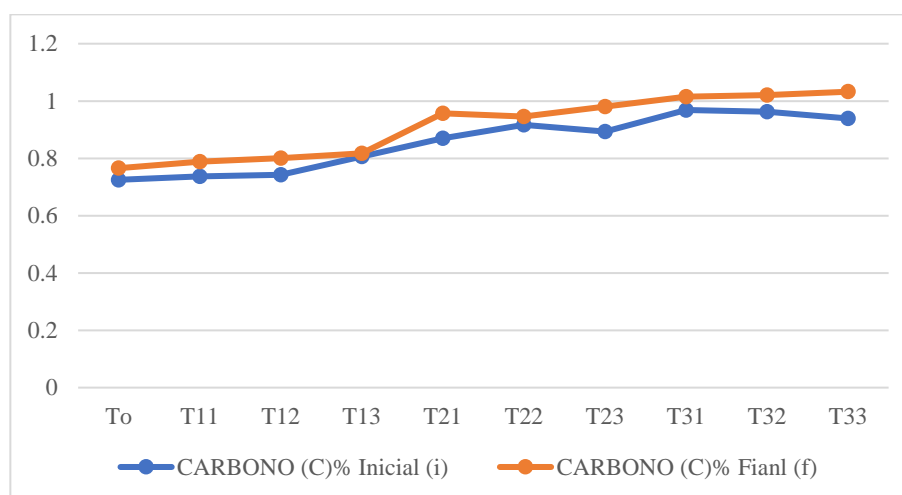


Figura 19. Comparación inicial y final de resultado de carbono.

La Figura 19 muestra los valores iniciales y finales del contenido de carbono (C) en el suelo para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un

aumento en el contenido de carbono, pasando de 0.725% a 0.765%. Este aumento podría estar relacionado con procesos naturales de acumulación de materia orgánica o una mayor actividad biológica del suelo que contribuye a la incorporación de carbono.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), también se registraron incrementos en el contenido de carbono. T11 pasó de 0.736% a 0.788%, T12 subió de 0.742% a 0.800%, y T13 experimentó un aumento de 0.806% a 0.817%. Estos resultados indican que el herbicida Devastor parece no interferir negativamente en la acumulación de carbono en el suelo, favoreciendo una ligera mejora en la materia orgánica.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observaron incrementos más pronunciados en el contenido de carbono. T21 subió de 0.870% a 0.957%, T22 pasó de 0.916% a 0.945%, y T23 experimentó un aumento significativo de 0.893% a 0.980%. Estos resultados sugieren que Itasato puede estar promoviendo un mayor almacenamiento de carbono en el suelo, lo que podría reflejar una mayor actividad biológica o una mejor estabilización de la materia orgánica.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), el contenido de carbono también aumentó de manera significativa. T31 pasó de 0.968% a 1.015%, T32 subió de 0.962% a 1.020%, y T33 aumentó de 0.939% a 1.032%. Estos incrementos son los más altos entre todos los tratamientos, lo que sugiere que Iguana podría tener un efecto positivo sobre la acumulación de carbono en el suelo, posiblemente debido a la estimulación de procesos biológicos o físicos que favorecen la incorporación y retención de carbono.

En general, todos los tratamientos, incluidos el testigo, mostraron aumentos en el contenido de carbono, lo que sugiere que los herbicidas no interfirieron negativamente con la acumulación de este nutriente en el suelo. De hecho, los herbicidas Itasato e Iguana parecen promover un mayor enriquecimiento de carbono, lo cual es favorable para la salud del suelo y la fertilidad a largo plazo.

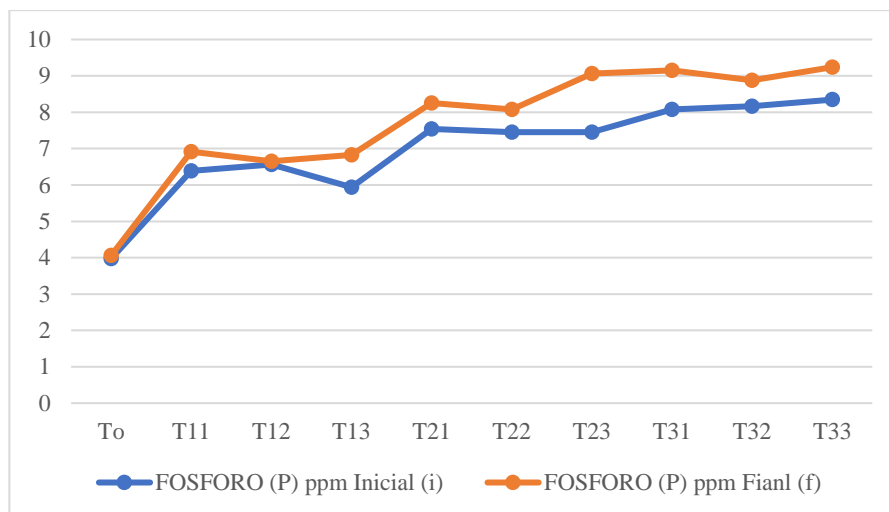


Figura 20. Comparación inicial y final de resultado de Fosforo.

La Figura 20 muestra los valores iniciales y finales del contenido de fósforo (P) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un incremento leve en el contenido de fósforo, pasando de 3.973 ppm a 4.063 ppm. Este cambio podría deberse a procesos naturales de mineralización de la materia orgánica o liberación de fósforo de las reservas del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se registraron incrementos moderados en el fósforo. T11 mostró un aumento de 6.383 ppm a 6.918 ppm, T12 subió de 6.561 ppm a 6.650 ppm, y T13 experimentó un incremento más significativo de 5.937 ppm a 6.829 ppm. Estos resultados sugieren que Devastor puede mejorar ligeramente la disponibilidad de fósforo en el suelo, posiblemente al alterar la dinámica de este nutriente.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), los incrementos en fósforo fueron más pronunciados. T21 pasó de 7.543 ppm a 8.257 ppm, T22 aumentó de 7.453 ppm a 8.078 ppm, y T23 experimentó un notable incremento de 7.453 ppm a 9.060 ppm. Estos resultados indican que Itasato podría estar promoviendo una mayor liberación o movilidad del fósforo en el suelo, favoreciendo su disponibilidad para las plantas.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), se observaron los mayores incrementos en el contenido de fósforo. T31 subió de 8.078 ppm a 9.149 ppm, T32 pasó de 8.167 ppm a 8.881 ppm, y T33 alcanzó el mayor aumento, de 8.346 ppm a 9.238 ppm. Estos resultados sugieren que Iguana tiene un efecto positivo significativo en la disponibilidad de fósforo, posiblemente a través de mecanismos que facilitan su liberación o reducen su fijación en el suelo.

En general, todos los tratamientos, incluido el testigo, mostraron un incremento en el contenido de fósforo, lo que sugiere que los herbicidas no reducen la disponibilidad de este nutriente en el suelo. De manera destacada, los tratamientos con Iguana presentaron los mayores incrementos, lo que sugiere que este herbicida podría ser particularmente favorable para la mejora de la fertilidad del suelo en términos de fósforo disponible.

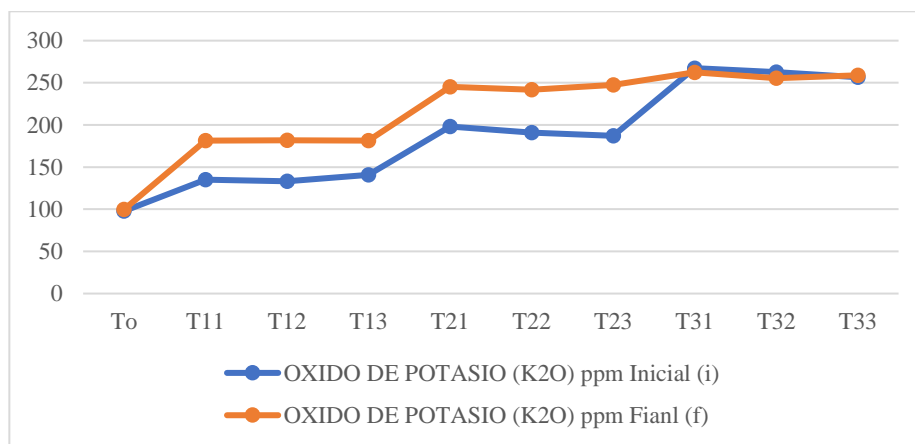


Figura 21. Comparación inicial y final de resultado de Oxido de potasio.

La Figura 21 muestra los valores iniciales y finales del contenido de óxido de potasio (K₂O) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un incremento leve en el contenido de K₂O, pasando de 97.82 ppm a 99.64 ppm. Este cambio podría ser atribuido a procesos naturales de mineralización o liberación de potasio del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se registraron incrementos significativos en el contenido de K₂O. T11 mostró un aumento de 135.19 ppm a 181.58 ppm, T12 pasó de 133.29 ppm a 181.62 ppm, y T13 presentó un incremento similar de 140.67 ppm a 181.39 ppm. Estos resultados indican que Devastor tiene un impacto positivo en la disponibilidad de potasio en el suelo, favoreciendo su incremento de manera considerable.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observaron los mayores aumentos en el contenido de K₂O. T21 incrementó de 198.29 ppm a 245.35 ppm, T22 pasó de 190.90 ppm a 241.87 ppm, y T23 registró el mayor aumento, de 186.96 ppm a 247.39 ppm. Estos resultados sugieren que Itasato es particularmente efectivo en incrementar la concentración de potasio disponible, probablemente al facilitar procesos que liberan potasio fijado en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), se observaron variaciones menos pronunciadas en los valores de K_2O . T31 disminuyó ligeramente de 267.38 ppm a 262.40 ppm, T32 también mostró una leve disminución de 262.56 ppm a 255.29 ppm, y T33 presentó un aumento menor de 256.63 ppm a 258.76 ppm. A diferencia de los otros herbicidas, Iguana parece tener un efecto limitado en el aumento del contenido de potasio, e incluso en algunos casos parece estar asociado a una ligera reducción, lo que podría estar relacionado con mecanismos de fijación o reducción de su movilidad en el suelo.

En general, todos los tratamientos con Devastor e Itasato mostraron incrementos significativos en el contenido de K_2O , siendo los tratamientos con Itasato los que presentaron los mayores aumentos. Por otro lado, los tratamientos con Iguana mostraron un comportamiento más conservador, con cambios mínimos o reducciones leves. Estos resultados sugieren que Devastor e Itasato son más efectivos para incrementar la disponibilidad de potasio en el suelo, mientras que Iguana parece tener un efecto más neutro o estabilizador en este nutriente.

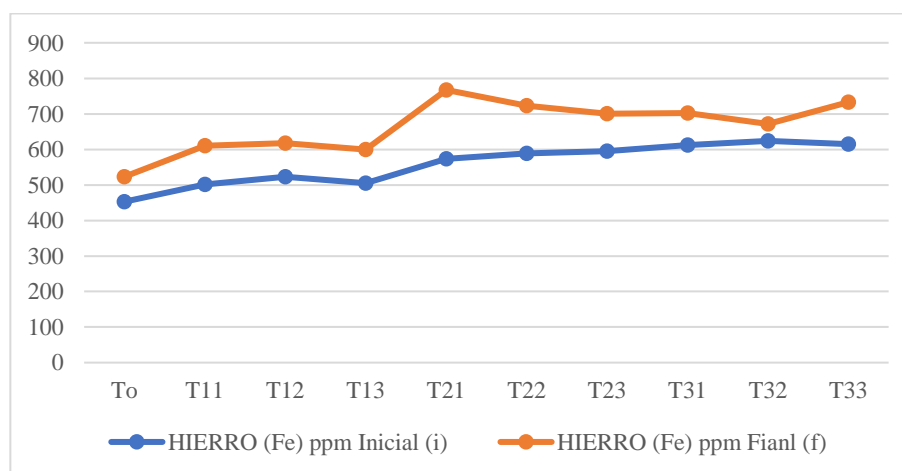


Figura 22. Comparación inicial y final de resultado de Hierro.

La Figura 22 muestra los valores iniciales y finales del contenido de hierro (Fe) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un incremento moderado en el contenido de hierro, pasando de 452.88 ppm a 523.16 ppm. Este cambio puede deberse a procesos naturales como la mineralización o la movilización de hierro en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se registraron incrementos significativos en el contenido de hierro. T11 mostró un aumento de 501.8 ppm

a 609.96 ppm, T12 pasó de 522.72 ppm a 617.36 ppm, y T13 incrementó de 505.4 ppm a 599.24 ppm. Estos resultados sugieren que Devastor favorece la disponibilidad de hierro en el suelo, posiblemente a través de su interacción con la química del suelo que permite la liberación de este micronutriente.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observaron los mayores incrementos en el contenido de hierro. T21 aumentó de 573.64 ppm a 767.4 ppm, T22 incrementó de 589.12 ppm a 722.6 ppm, y T23 presentó un aumento de 595.24 ppm a 700.85 ppm. Estos resultados indican que Itasato tiene un impacto significativo en la disponibilidad de hierro, probablemente al inducir procesos que movilizan hierro inmovilizado en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los cambios en el contenido de hierro fueron más moderados en comparación con Itasato. T31 incrementó ligeramente de 612.57 ppm a 702.52 ppm, T32 pasó de 623.99 ppm a 671.4 ppm, y T33 mostró un aumento más notable, de 614.72 ppm a 733.16 ppm. Esto sugiere que Iguana también promueve la disponibilidad de hierro en el suelo, aunque con un impacto menor en comparación con Itasato.

En general, todos los tratamientos mostraron un aumento en el contenido de hierro, siendo los incrementos más significativos en los tratamientos con Itasato, seguido de Devastor e Iguana. Estos resultados destacan el potencial de Itasato para mejorar la disponibilidad de hierro en el suelo, mientras que Devastor e Iguana también tienen un efecto positivo, aunque de menor magnitud. El testigo (To), sin tratamiento con herbicidas, mostró un aumento más limitado, lo que refuerza la influencia de los herbicidas en la dinámica del hierro en el suelo.

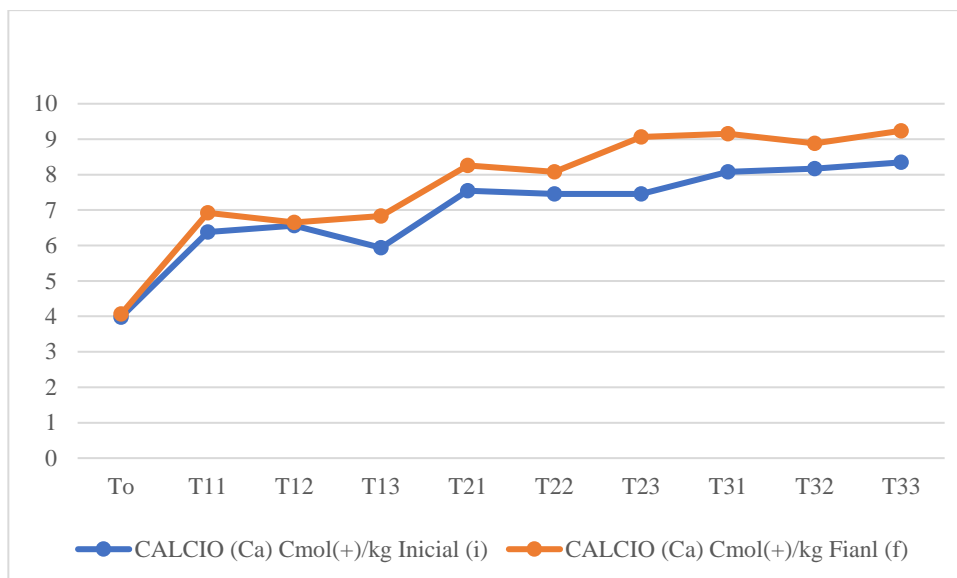


Figura 23. Comparación inicial y final de resultado de calcio

La Figura 23 muestra los valores iniciales y finales del contenido de calcio (Ca) en el suelo, expresado en Cmol(+)/kg, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), el contenido de calcio aumentó ligeramente, de 3.973 a 4.062 Cmol(+)/kg, lo que sugiere que en ausencia de herbicidas, podrían ocurrir procesos naturales como la lixiviación o la mineralización que incrementan ligeramente este nutriente.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se observaron aumentos en el contenido de calcio, aunque con variaciones entre los tratamientos. T11 pasó de 6.382 a 6.918 Cmol(+)/kg, mostrando un aumento considerable. T12 también presentó un incremento, aunque más moderado, de 6.561 a 6.650 Cmol(+)/kg. T13 mostró un aumento similar a T11, de 5.936 a 6.828 Cmol(+)/kg. Los tratamientos con Devastor parecen haber promovido un aumento del calcio en el suelo, lo que podría estar relacionado con la alteración de la estructura del suelo o la liberación de calcio disponible para las plantas.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), también se observó un aumento significativo en el contenido de calcio. T21 pasó de 7.542 a 8.256 Cmol(+)/kg, T22 de 7.453 a 8.078 Cmol(+)/kg, y T23 de 7.453 a 9.060 Cmol(+)/kg. Los incrementos en estos tratamientos son más pronunciados que en el testigo y pueden sugerir que Itasato favorece la disponibilidad de calcio en el suelo, lo que podría estar relacionado con sus efectos sobre la estructura o la mineralización del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los aumentos en el contenido de calcio fueron similares a los observados con Itasato. T31 pasó de 8.078 a

9.149 Cmol(+)/kg, T32 de 8.167 a 8.881 Cmol(+)/kg, y T33 de 8.346 a 9.238 Cmol(+)/kg. Iguana parece tener un efecto positivo sobre la disponibilidad de calcio, aunque con ligeras variaciones en comparación con los otros herbicidas.

En general, todos los tratamientos con herbicidas, incluido el testigo, mostraron un aumento en el contenido de calcio en el suelo. Sin embargo, los tratamientos con Devastor, Itasato e Iguana, especialmente T21 y T23, mostraron aumentos más pronunciados, lo que sugiere que estos herbicidas podrían estar influyendo en la disponibilidad o movilización de calcio en el suelo.

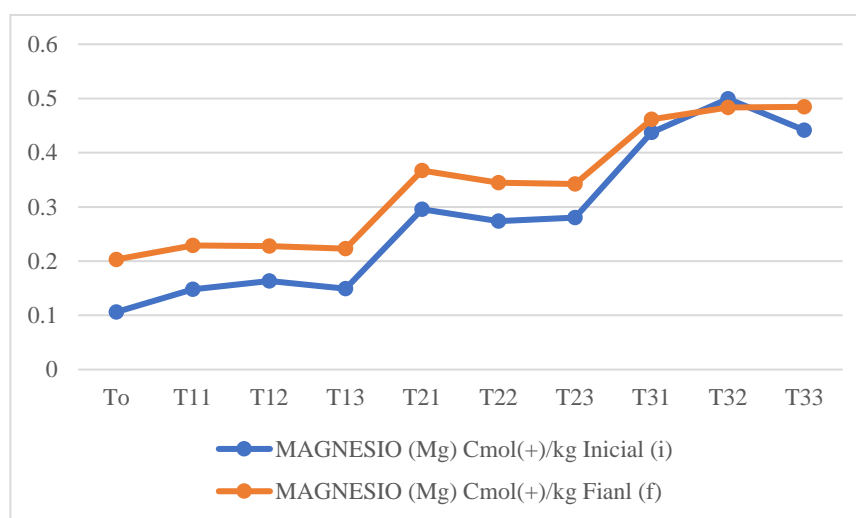


Figura 24. Comparación inicial y final de resultado de Magnesio.

La Figura 24 muestra los resultados de Magnesio (Mg) en el suelo, expresado en Cmol(+)/kg, tanto en las mediciones iniciales como finales, para diferentes tratamientos con herbicidas. El testigo (To) muestra un incremento en el contenido de magnesio, pasando de 0.106 a 0.203 Cmol(+)/kg, lo que podría reflejar procesos naturales de mineralización o alteración del suelo que incrementan la disponibilidad de este nutriente.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), también se observó un aumento en los niveles de magnesio. T11 mostró un aumento de 0.148 a 0.229 Cmol(+)/kg, T12 de 0.1635 a 0.2274 Cmol(+)/kg, y T13 de 0.1492 a 0.2228 Cmol(+)/kg. Estos aumentos en magnesio podrían ser indicativos de la capacidad de Devastor para modificar la disponibilidad de este nutriente en el suelo, posiblemente por alteraciones en la estructura o procesos de liberación de nutrientes.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), los incrementos fueron más notables. T21 aumentó de 0.2957 a 0.3672 Cmol(+)/kg, T22 de 0.2737 a 0.3445 Cmol(+)/kg, y T23 de 0.2801 a 0.3422 Cmol(+)/kg. El aumento de magnesio en estos

tratamientos es relativamente significativo, lo que sugiere que Itasato tiene un efecto positivo en la disponibilidad de magnesio en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los incrementos fueron más moderados. T31 pasó de 0.4375 a 0.4617 Cmol(+)/kg, T32 de 0.4993 a 0.4836 Cmol(+)/kg, y T33 de 0.4412 a 0.4846 Cmol(+)/kg. Aunque Iguana también mostró un incremento en el magnesio, este fue más leve comparado con los otros herbicidas.

En general, todos los tratamientos, incluidos los del testigo, mostraron un aumento en los niveles de magnesio en el suelo. Los tratamientos con Itasato (T21) y Devastor (T11) presentaron los incrementos más significativos, lo que sugiere que estos herbicidas podrían estar promoviendo la liberación o disponibilidad de magnesio en el suelo. Sin embargo, Iguana mostró un efecto más moderado sobre este nutriente.

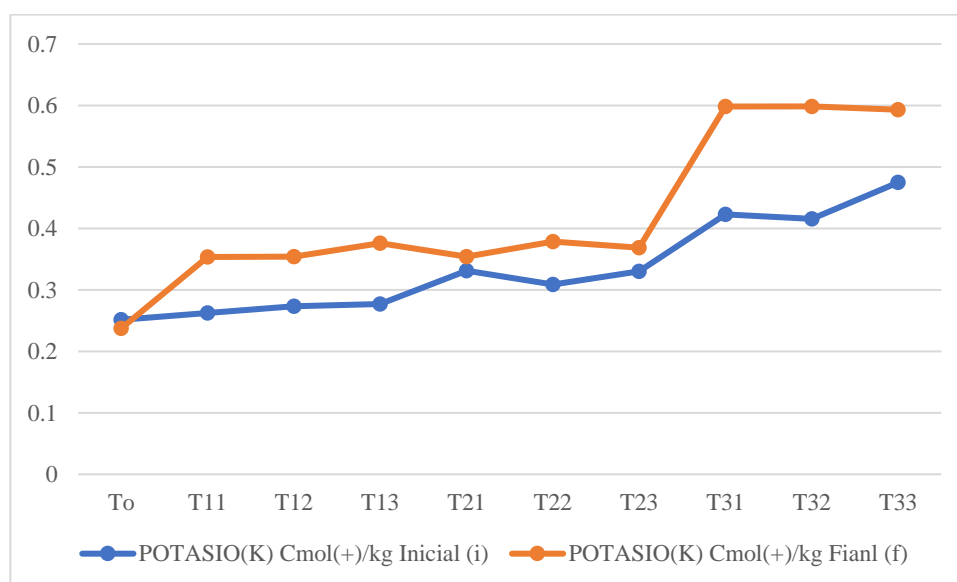


Figura 25. Comparación inicial y final de resultado de potasio.

La Figura 25 presenta los resultados de Potasio (K) en el suelo, expresado en Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales de diferentes tratamientos con herbicidas y el testigo (To). El testigo (To) muestra una ligera disminución en los niveles de potasio, de 0.2514 a 0.2374 Cmol(+)/kg, lo que podría ser consecuencia de procesos naturales de lixiviación o reducción de la disponibilidad de este nutriente en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), los niveles de potasio aumentaron significativamente. T11 mostró un incremento de 0.2623 a 0.3535 Cmol(+)/kg, T12 de 0.2735 a 0.354 Cmol(+)/kg, y T13 de 0.2769 a 0.3759 Cmol(+)/kg.

Este aumento en potasio puede ser un indicativo de que el herbicida Devastor favorece la liberación o movilidad del potasio en el suelo, incrementando su disponibilidad.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), también se observó un aumento, aunque menos pronunciado. T21 aumentó de 0.3311 a 0.3539 Cmol(+)/kg, T22 de 0.3087 a 0.3786 Cmol(+)/kg, y T23 de 0.3299 a 0.3688 Cmol(+)/kg. Aunque los incrementos fueron más modestos que con Devastor, Itasato también parece tener un efecto positivo en la concentración de potasio en el suelo.

Los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33) mostraron incrementos más marcados. T31 pasó de 0.4228 a 0.598 Cmol(+)/kg, T32 de 0.4154 a 0.5984 Cmol(+)/kg, y T33 de 0.4747 a 0.5932 Cmol(+)/kg. Estos incrementos en potasio son los más altos entre los herbicidas estudiados, lo que sugiere que Iguana tiene un efecto considerable en la liberación o retención de potasio en el suelo.

En general, todos los tratamientos, incluido el testigo, mostraron variaciones en los niveles de potasio. Los tratamientos con Devastor e Iguana (T31, T32, T33) mostraron los aumentos más pronunciados, mientras que Itasato también causó incrementos, aunque de menor magnitud. Esto sugiere que Iguana tiene un impacto mayor en la concentración de potasio en el suelo en comparación con los otros herbicidas.

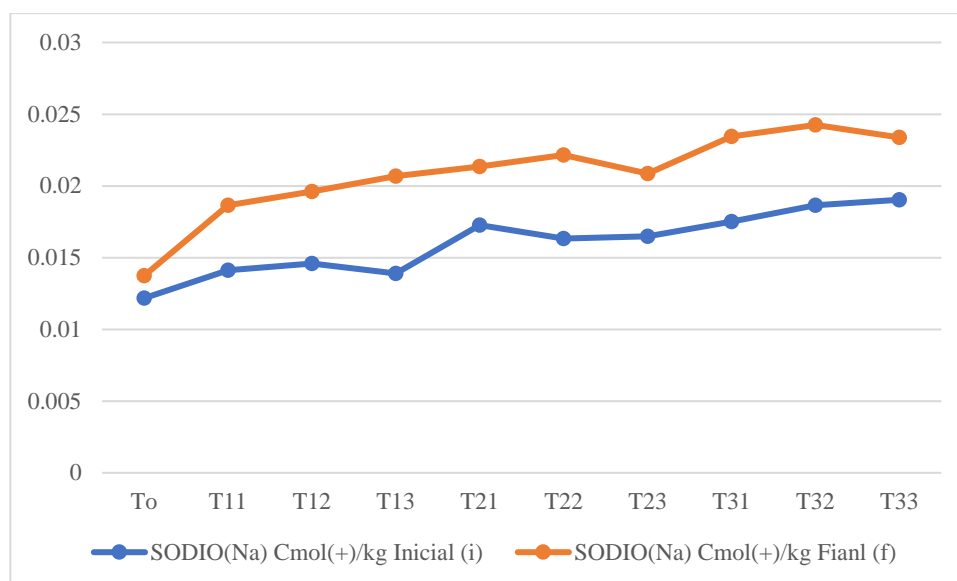


Figura 26. Comparación inicial y final de resultado de Sodio.

La Figura 26 presenta los resultados de Sodio (Na) en el suelo, expresado en Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales de los diferentes tratamientos con herbicidas y el testigo (To). El testigo (To) muestra un ligero incremento en los niveles de sodio, de 0.0122 a 0.0137 Cmol(+)/kg, lo que podría ser una variación natural del suelo o un efecto de las condiciones ambientales en el momento de la medición.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se observa un aumento progresivo en los niveles de sodio. T11 pasó de 0.0141 a 0.0187 Cmol(+)/kg, T12 de 0.0146 a 0.0196 Cmol(+)/kg, y T13 de 0.0139 a 0.0207 Cmol(+)/kg. Esto sugiere que el herbicida Devastor podría estar favoreciendo una mayor acumulación de sodio en el suelo, posiblemente por cambios en la movilidad o disponibilidad de este nutriente debido al herbicida.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), también se observó un aumento en los niveles de sodio. T21 pasó de 0.0173 a 0.0214 Cmol(+)/kg, T22 de 0.0163 a 0.0221 Cmol(+)/kg, y T23 de 0.0165 a 0.0209 Cmol(+)/kg. Los incrementos observados son relativamente modestos, pero indican que el herbicida Itasato también tiene un efecto en la concentración de sodio en el suelo.

Los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33) mostraron los incrementos más altos en los niveles de sodio. T31 pasó de 0.0175 a 0.0235 Cmol(+)/kg, T32 de 0.0187 a 0.0243 Cmol(+)/kg, y T33 de 0.0190 a 0.0234 Cmol(+)/kg. Estos resultados sugieren que Iguana tiene un impacto notable en la acumulación de sodio en el suelo, especialmente en comparación con los otros herbicidas.

En general, todos los tratamientos, incluido el testigo, mostraron un aumento en los niveles de sodio. Iguana fue el herbicida que causó los mayores incrementos en sodio, seguido por Devastor y Itasato. Esto sugiere que Iguana podría estar afectando la dinámica del sodio en el suelo de manera más pronunciada que los otros herbicidas.

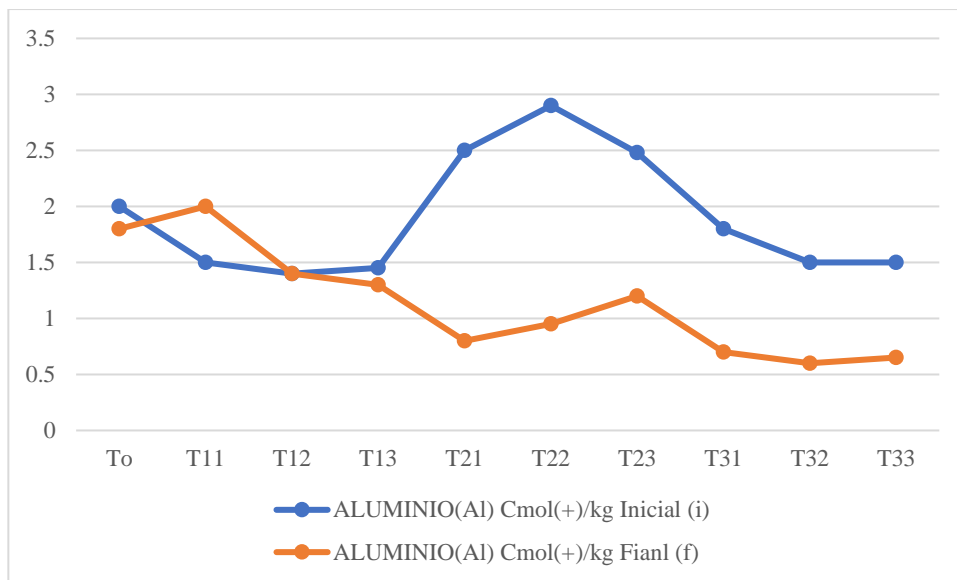


Figura 27. Comparación inicial y final de resultado de aluminio.

La Figura 27 presenta los resultados de Aluminio (Al) en el suelo, expresado en Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales de los diferentes tratamientos con herbicidas y el testigo (To). En el caso del testigo (To), se observó una disminución en los niveles de aluminio, pasando de 2.0 a 1.8 Cmol(+)/kg, lo que sugiere una ligera reducción en la concentración de aluminio, posiblemente por procesos naturales de alteración del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), los resultados fueron variados. T11 mostró un aumento en los niveles de aluminio, de 1.5 a 2.0 Cmol(+)/kg, mientras que T12 mantuvo el mismo nivel inicial (1.4 Cmol(+)/kg) a lo largo del tratamiento, sin cambios significativos. Por otro lado, T13 mostró una disminución en los niveles de aluminio, pasando de 1.45 a 1.3 Cmol(+)/kg. Estos resultados sugieren que el efecto del herbicida Devastor sobre el aluminio varía según el tratamiento, posiblemente debido a la interacción de este con las características específicas del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observó una reducción significativa en los niveles de aluminio. T21 pasó de 2.5 a 0.8 Cmol(+)/kg, T22 de 2.9 a 0.95 Cmol(+)/kg, y T23 de 2.48 a 1.2 Cmol(+)/kg. Estos resultados indican que

Itasato podría estar favoreciendo la reducción de aluminio en el suelo, posiblemente por alteraciones en la disponibilidad de este nutriente o debido a la interacción química del herbicida con el suelo.

Los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33) mostraron las mayores reducciones en los niveles de aluminio. T31 pasó de 1.8 a 0.7 Cmol(+)/kg, T32 de 1.5 a 0.6 Cmol(+)/kg, y T33 de 1.5 a 0.65 Cmol(+)/kg. Esto sugiere que Iguana tiene un efecto considerable en la disminución de los niveles de aluminio en el suelo, más pronunciado que el de los otros herbicidas.

En general, todos los tratamientos con herbicidas, incluyendo el testigo, mostraron variaciones en los niveles de aluminio, con disminuciones significativas en los tratamientos con Itasato e Iguana. Esto sugiere que estos herbicidas podrían estar favoreciendo la reducción de aluminio en el suelo, lo que podría tener implicaciones para la disponibilidad de este metal en el medio ambiente.

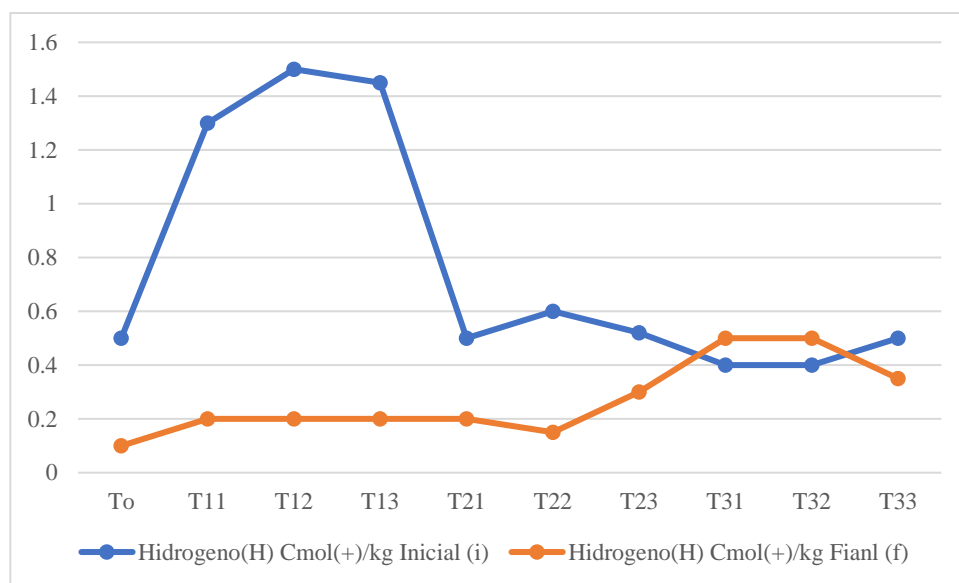


Figura 28. Comparación inicial y final de resultado de Hidrogeno.

La Figura 28 muestra los resultados de Hidrógeno (H) en el suelo, expresado en Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales en las diferentes muestras y tratamientos.

En el testigo (To), se observa una notable disminución en los niveles de hidrógeno, de 0.5 Cmol(+)/kg a 0.1 Cmol(+)/kg. Esto indica que, posiblemente, se ha producido una reducción natural en la concentración de hidrógeno en el suelo durante el período de medición.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), los resultados indican una disminución considerable en los niveles de hidrógeno. T11 pasó de 1.3 a 0.2 Cmol(+)/kg, T12 de 1.5 a 0.2 Cmol(+)/kg, y T13 de 1.45 a 0.2 Cmol(+)/kg. Esta caída sugiere que Devastor podría tener un efecto de reducción significativo en los niveles de hidrógeno en el suelo, lo que podría estar relacionado con la alteración de las características químicas del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observa que los niveles de hidrógeno también disminuyeron, aunque no de forma tan drástica. T21 pasó de 0.5 a 0.2 Cmol(+)/kg, T22 de 0.6 a 0.15 Cmol(+)/kg, y T23 de 0.52 a 0.3 Cmol(+)/kg. Al igual que con Devastor, los resultados sugieren una posible influencia del herbicida en la disminución de hidrógeno en el suelo, aunque el impacto es menos pronunciado.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los resultados muestran una tendencia diferente. T31 pasó de 0.4 a 0.5 Cmol(+)/kg, T32 permaneció igual, de 0.4 a 0.5 Cmol(+)/kg, y T33 pasó de 0.5 a 0.35 Cmol(+)/kg. En estos casos, la concentración de hidrógeno no sufrió una disminución significativa en la mayoría de los tratamientos, y en algunos casos, como en T31 y T32, incluso aumentó ligeramente. Esto podría indicar que Iguana tiene un efecto menos agresivo en la reducción de hidrógeno en el suelo, o incluso podría estar favoreciendo su acumulación.

En general, los resultados de la Figura 28 indican que los tratamientos con Devastor e Itasato tienden a reducir los niveles de hidrógeno en el suelo, mientras que los tratamientos con Iguana presentan una variabilidad más amplia, con algunos de ellos manteniendo o incluso incrementando los niveles de hidrógeno. Estos efectos pueden estar relacionados con las interacciones específicas entre los herbicidas y las propiedades químicas del suelo.

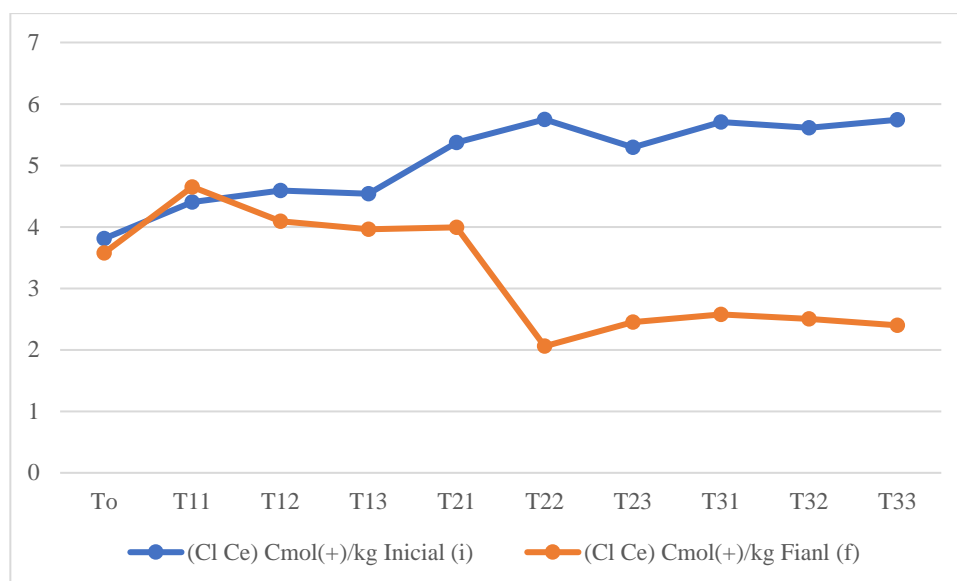


Figura 29. Comparación inicial y final de resultado de CI Ce.

La Figura 29 muestra los resultados de la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CI Ce) en el suelo, expresada en Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales en las diferentes muestras y tratamientos.

En el testigo (To), se observa una ligera disminución en los niveles de CI Ce, pasando de 3.8097 Cmol(+)/kg a 3.5743 Cmol(+)/kg. Esta disminución es pequeña y podría reflejar una variación natural en la capacidad del suelo para retener cationes durante el período de medición.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), los resultados muestran efectos mixtos. T11 pasó de 4,4044 a 4,6512 Cmol(+)/kg, lo que indica un ligero aumento en la capacidad de intercambio catiónico. T12 pasó de 4.5916 a 4.0910 Cmol(+)/kg, y T13 de 4.5400 a 3.9594 Cmol(+)/kg, mostrando disminuciones. Esto sugiere que el efecto de Devastor es variable, con un aumento en T11 y disminuciones en T12 y T13.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observa una disminución considerable en la capacidad de intercambio catiónico. T21 pasó de 5,3740 a 3,9925 Cmol(+)/kg, T22 de 5,7487 a 2,0592 Cmol(+)/kg, y T23 de 5,2966 a 2,4508 Cmol(+)/kg, con una disminución notable en todos los casos. Esto sugiere que Itasato tiene un efecto significativo en la reducción de la capacidad del suelo para retener cationes.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), también se observa una disminución en la capacidad de intercambio catiónico en todas las muestras. T31 pasó

de 5,7078 a 2,5761 Cmol(+)/kg, T32 de 5,6134 a 2,5053 Cmol(+)/kg, y T33 de 5,7449 a 2,4022 Cmol(+)/kg. Al igual que con Itasato, Iguana mostró un impacto negativo en la capacidad del suelo para retener cationes.

En general, los tratamientos con Devastor mostraron resultados mixtos, con un aumento en T11 y disminuciones menores en T12 y T13. Por otro lado, tanto los tratamientos con Itasato como con Iguana causaron una disminución considerable en la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva, especialmente en los tratamientos con Itasato. Esto sugiere que estos herbicidas tienen un efecto negativo en la capacidad del suelo para retener cationes, mientras que el efecto de Devastor varió dependiendo de la muestra.

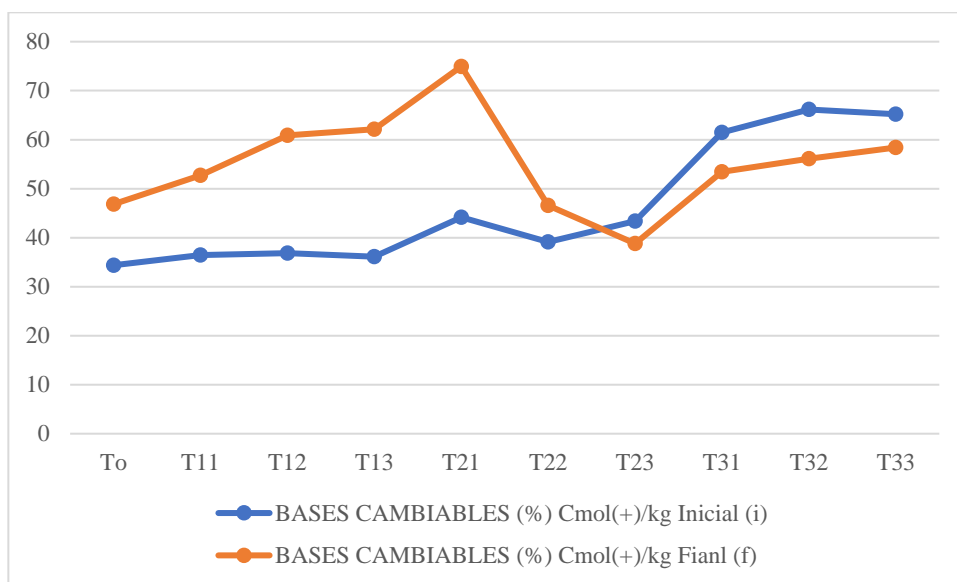


Figura 30. Comparación inicial y final de resultado de Bases Cambiables.

La Figura 30 muestra los resultados de Bases Cambiables (en Cmol(+)/kg) en el suelo, tanto para las mediciones iniciales como finales en las diferentes muestras y tratamientos.

En el testigo (To), se observa un aumento en las bases cambiables, pasando de 34.38% a 46.84%. Este aumento sugiere una mejora en la capacidad del suelo para retener bases cambiables durante el período de medición, lo que puede ser un indicio de una mejora en la fertilidad del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se observa un aumento significativo en las bases cambiables en todos los casos. T11 pasó de 36.43% a 52.70%, T12 de 36.84% a 60.89%, y T13 de 36.12% a 62.12%. Estos resultados indican

que Devastor puede estar promoviendo una mayor disponibilidad de bases cambiables en el suelo, lo que podría mejorar su capacidad para retener nutrientes.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), los resultados muestran un comportamiento mixto. T21 pasó de 44.18% a 74.95%, lo que indica un notable aumento en las bases cambiables. Sin embargo, T22 mostró un aumento más modesto, de 39.12% a 46.58%, y T23 experimentó una disminución, pasando de 43.36% a 38.80%. Esto sugiere que el efecto de Itasato sobre las bases cambiables varía según el tratamiento, con un efecto positivo en T21 y una reducción en T23.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los resultados muestran una tendencia a la disminución en las bases cambiables, aunque no tan drástica. T31 pasó de 61.46% a 53.42%, T32 de 66.15% a 56.09%, y T33 de 65.19% a 58.37%. Esto sugiere que Iguana podría tener un efecto de reducción en las bases cambiables, aunque el impacto no fue tan pronunciado como en los tratamientos con Itasato.

En general, los resultados indican que Devastor tiende a aumentar las bases cambiables en el suelo, lo que puede mejorar la disponibilidad de nutrientes. En cambio, los tratamientos con Itasato muestran una variabilidad en el impacto sobre las bases cambiables, con algunos casos de aumento y otros de disminución. Por otro lado, los tratamientos con Iguana tienden a reducir las bases cambiables, aunque el efecto no fue tan pronunciado. Estos resultados sugieren que los herbicidas pueden tener un impacto significativo en las propiedades químicas del suelo, especialmente en la disponibilidad de bases cambiables.

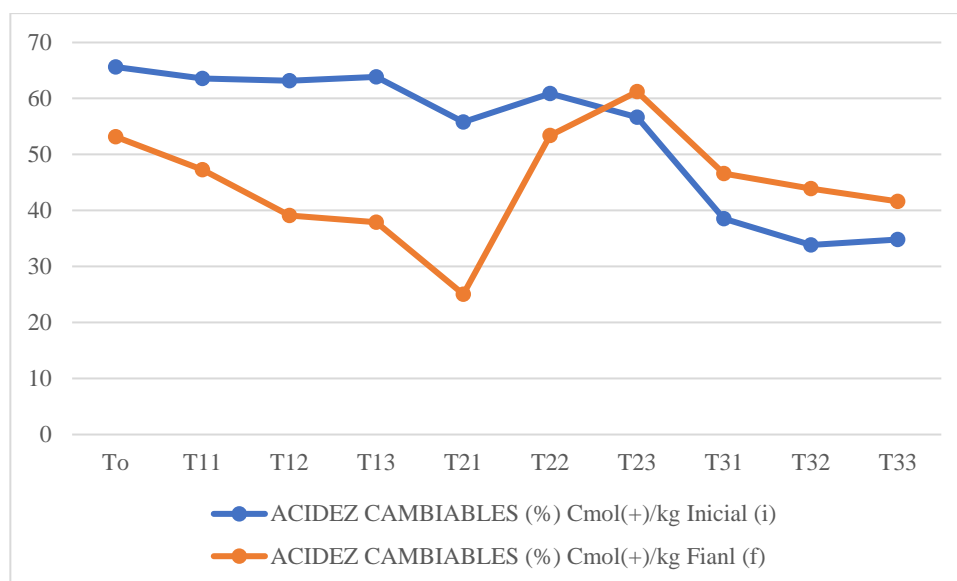


Figura 31. Comparación inicial y final de resultado de Acidez Cambiables.

La Figura 31 muestra los resultados de Acidez Cambiable en el suelo, expresados en Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales en las diferentes muestras y tratamientos.

En el testigo (To), se observa una disminución significativa en la acidez cambiante, pasando de 65.62% a 53.16%. Esta reducción sugiere una tendencia hacia un pH más favorable en el suelo durante el período de medición, lo que podría implicar una mejora en las condiciones para el crecimiento de las plantas.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), también se observa una disminución de la acidez cambiante en todos los casos. T11 pasó de 63.57% a 47.30%, T12 de 63.16% a 39.11%, y T13 de 63.88% a 37.88%. Estos resultados indican que Devastor podría estar contribuyendo a la reducción de la acidez en el suelo, lo que podría favorecer la disponibilidad de nutrientes y mejorar la calidad del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observa una tendencia mixta en cuanto a la acidez cambiante. T21 pasó de 55.82% a 25.05%, lo que indica una reducción notable de la acidez, mientras que T22 experimentó una pequeña disminución de 60.88% a 53.42%. Sin embargo, T23 mostró un aumento en la acidez cambiante, pasando de 56.64% a 61.20%, lo que sugiere que este tratamiento podría tener un efecto contrario, incrementando la acidez en el suelo.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los resultados indican una leve disminución de la acidez cambiante, aunque menos pronunciada que en otros

tratamientos. T31 pasó de 38.54% a 46.58%, T32 de 33.85% a 43.91%, y T33 de 34.81% a 41.63%. Estos resultados sugieren que Iguana podría estar provocando un aumento de la acidez cambiante, aunque no tan drástico como en el caso de T23.

En general, los resultados de la Figura 31 indican que los tratamientos con Devastor tienden a reducir la acidez cambiante en el suelo, lo que puede ser beneficioso para la disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, los tratamientos con Itasato muestran una variabilidad en su impacto, con algunos casos de reducción significativa de la acidez y otros con aumentos. Los tratamientos con Iguana también muestran un leve aumento en la acidez cambiante, aunque no tan pronunciado como el observado en Itasato. Estos efectos podrían estar relacionados con la interacción de los herbicidas con las características químicas del suelo.

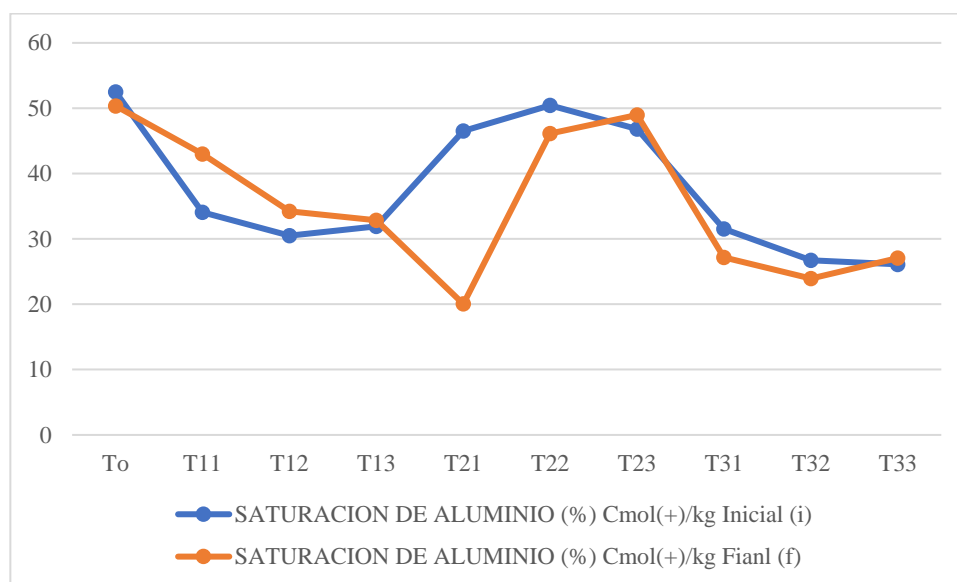


Figura 32. Comparación inicial y final de resultado de Saturación de Aluminio.

La figura 32 muestra los resultados de Saturación de Aluminio en el suelo, expresados en porcentaje (%) de Cmol(+)/kg, para las mediciones iniciales y finales en las diferentes muestras y tratamientos.

En el testigo (To), la saturación de aluminio presenta una ligera disminución, pasando de 52.50% a 50.36%. Esto sugiere que, en condiciones naturales, hubo una ligera reducción en la saturación de aluminio durante el período de medición.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se observa un aumento en la saturación de aluminio en todos los casos. T11 pasó de 34.06% a 43.00%, T12 de 30.49% a 34.22%, y T13 de 31.94% a 32.83%. Esto podría indicar que Devastor

tiene un efecto en la liberación de aluminio en el suelo, lo que podría estar relacionado con alteraciones en las propiedades químicas del suelo, posiblemente disminuyendo su capacidad de retención de otros nutrientes.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observa una reducción significativa en la saturación de aluminio en algunos casos. T21 pasó de 46.52% a 20.04%, lo que representa una disminución importante, mientras que T22 pasó de 50.45% a 46.14%. Sin embargo, T23 mostró un aumento en la saturación de aluminio, de 46.82% a 48.96%, lo que sugiere que Itasato podría tener un impacto variable en la liberación de aluminio, dependiendo del tratamiento específico.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los resultados muestran una tendencia de reducción en la saturación de aluminio, aunque en menor medida que en el tratamiento con Itasato. T31 pasó de 31.54% a 27.17%, T32 de 26.72% a 23.95%, y T33 de 26.11% a 27.06%. Aunque la reducción en la saturación de aluminio no es tan pronunciada como en el caso de T21, estos resultados sugieren que Iguana podría estar contribuyendo a una disminución de la saturación de aluminio en el suelo, lo cual podría mejorar las condiciones para la disponibilidad de otros nutrientes esenciales.

En general, los resultados de la Figura 32 indican que el tratamiento con Devastor tiende a aumentar la saturación de aluminio en el suelo, lo que podría afectar negativamente la disponibilidad de nutrientes. Los tratamientos con Itasato muestran un efecto variable, con una reducción significativa en algunos casos, pero un aumento en otros. Los tratamientos con Iguana muestran una reducción moderada en la saturación de aluminio, lo cual podría ser beneficioso para mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Estos efectos están relacionados con las interacciones entre los herbicidas y las propiedades químicas del suelo, especialmente en términos de su capacidad para retener cationes como el aluminio.

4.3. La relación entre el uso de herbicidas y los metales traça Cadmio, Manganeso, Plomo, Cobre, y Zinc en suelos del cultivo del *Teobroma cacao L.*

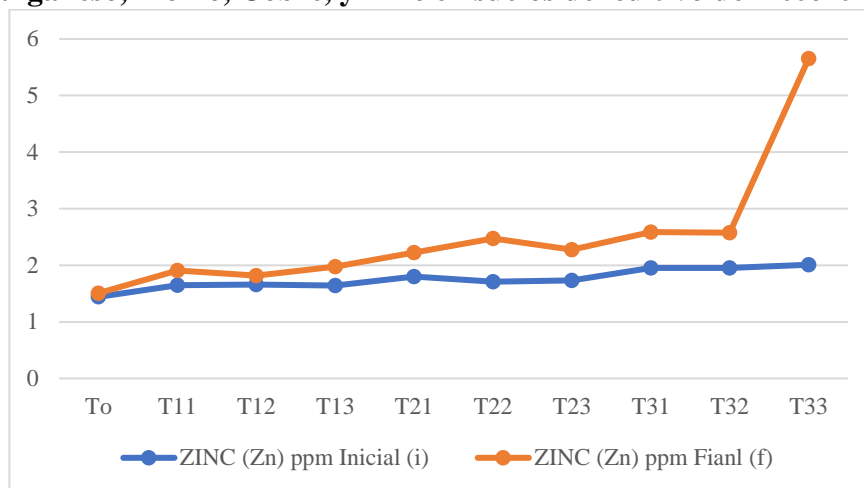


Figura 33. Comparación inicial y final de resultado de Zinc.

La Figura 33 muestra los valores iniciales y finales del contenido de zinc (Zn) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un ligero incremento en el contenido de zinc, pasando de 1.4424 ppm a 1.5078 ppm. Este cambio moderado puede estar asociado a procesos naturales como la mineralización o la disponibilidad de zinc en el suelo debido a la actividad biológica.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se registraron incrementos significativos en el contenido de zinc. T11 mostró un aumento de 1.6464 ppm a 1.9068 ppm, T12 pasó de 1.658 ppm a 1.82 ppm, y T13 incrementó de 1.641 ppm a 1.975 ppm. Estos resultados indican que Devastor promueve la disponibilidad de zinc en el suelo, probablemente a través de su interacción con los compuestos minerales que contienen este micronutriente.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), se observaron incrementos más marcados en el contenido de zinc. T21 aumentó de 1.798 ppm a 2.2248 ppm, T22 mostró un cambio notable de 1.7108 ppm a 2.4724 ppm, y T23 incrementó de 1.733 ppm a 2.278 ppm. Estos resultados sugieren que Itasato tiene un impacto más pronunciado en la movilización del zinc en el suelo, incrementando su disponibilidad significativamente.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), los incrementos en el contenido de zinc fueron aún más destacados, especialmente en T33. T31 pasó de 1.952 ppm a 2.589 ppm, T32 incrementó de 1.956 ppm a 2.575 ppm, y T33 mostró el cambio más drástico, pasando de 2.009 ppm a 5.654 ppm. Estos resultados reflejan que Iguana

puede tener un efecto muy fuerte en la liberación de zinc, particularmente en ciertas condiciones específicas representadas en T33.

En general, todos los tratamientos mostraron incrementos en el contenido de zinc, con la mayor variación observada en los tratamientos con Iguana, especialmente en T33. Itasato también presentó incrementos significativos, mientras que Devastor mostró un impacto positivo, pero más moderado. El testigo (To) mostró el menor cambio, lo que refuerza la influencia de los herbicidas en la dinámica del zinc en el suelo.

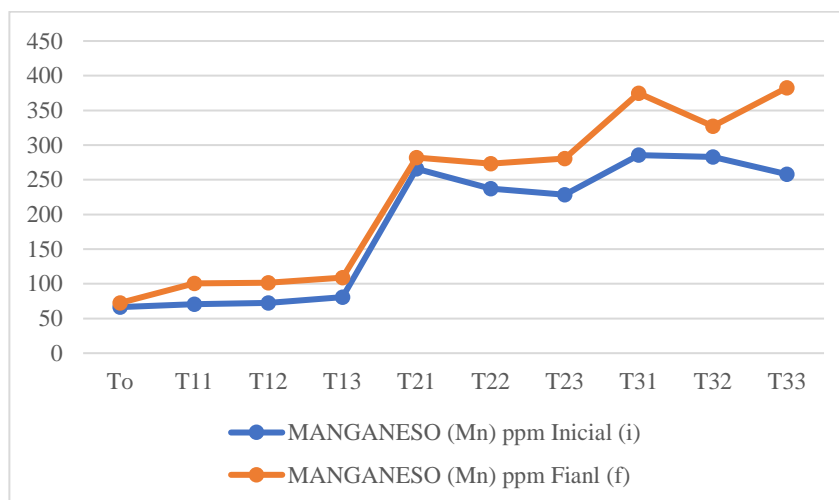


Figura 34. Comparación inicial y final de resultado de Manganeseo.

La Figura 34 muestra los valores iniciales y finales del contenido de manganese (Mn) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. El testigo (To) mostró un incremento moderado en el contenido de manganese, pasando de 66.4 ppm a 72.48 ppm. Este incremento podría estar relacionado con procesos naturales de liberación de manganese en el suelo debido a la actividad biológica o cambios en las condiciones ambientales.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se registraron aumentos significativos en el contenido de manganese. T11 pasó de 70.8 ppm a 100.72 ppm, T12 aumentó de 72.325 ppm a 101.56 ppm, y T13 mostró un aumento de 80.952 ppm a 108.857 ppm. Estos resultados indican que Devastor favorece la liberación de manganese en el suelo, lo que podría estar relacionado con la acción del herbicida en la movilización de nutrientes o con la alteración de la estructura del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), también se observaron incrementos, pero de menor magnitud en comparación con los tratamientos con Devastor. T21 aumentó de 265.825 ppm a 281.758 ppm, T22 pasó de 237.04 ppm a 273.16 ppm, y

T23 incrementó de 228.64 ppm a 280.458 ppm. Aunque el incremento es notable, los valores iniciales son más altos, lo que sugiere que Itasato tiene un impacto menos pronunciado en la movilización de manganeso en suelos ya ricos en este nutriente.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), se observaron aumentos significativos, especialmente en T31 y T33. T31 pasó de 285.478 ppm a 374.521 ppm, T32 aumentó de 282.658 ppm a 327.12 ppm, y T33 mostró el incremento más destacado, pasando de 257.963 ppm a 382.698 ppm. Iguana parece tener un fuerte efecto en la liberación de manganeso, especialmente en suelos con concentraciones ya altas, como en T31 y T33.

En general, todos los tratamientos mostraron un incremento en el contenido de manganeso, siendo Iguana el herbicida con el mayor impacto, especialmente en T33. Devastor también mostró un aumento significativo en el manganeso, especialmente en T13. Por otro lado, Itasato tuvo un efecto moderado, con un aumento en el contenido de manganeso, pero más contenido inicial. El testigo (To) mostró un incremento más modesto en comparación con los herbicidas, lo que resalta la influencia de estos en la dinámica de manganeso en el suelo.

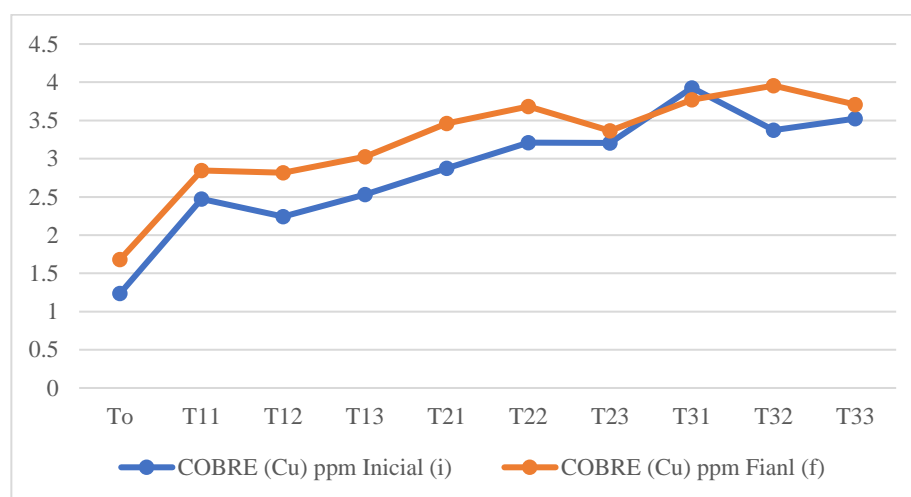


Figura 35. Comparación inicial y final de resultado de cobre.

La Figura 35 muestra los valores iniciales y finales del contenido de cobre (Cu) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. El testigo (To) mostró un aumento en el contenido de cobre, pasando de 1.236 ppm a 1.68 ppm. Este incremento podría deberse a procesos naturales de movilización del cobre en el suelo, como la actividad biológica o cambios en las condiciones del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), se observó un incremento notable en el contenido de cobre. T11 aumentó de 2.472 ppm a 2.844 ppm, T12 pasó de 2.244 ppm a 2.816 ppm, y T13 mostró un incremento de 2.532 ppm a 3.024 ppm. Estos aumentos indican que el herbicida Devastor parece favorecer la liberación de cobre en el suelo, lo que podría estar relacionado con la acción del herbicida en la alteración de la estructura del suelo o en la movilización de nutrientes.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), también se registraron aumentos en el contenido de cobre. T21 pasó de 2.876 ppm a 3.46 ppm, T22 aumentó de 3.208 ppm a 3.684 ppm, y T23 mostró un ligero aumento de 3.204 ppm a 3.364 ppm. Al igual que con Devastor, Itasato parece favorecer la liberación de cobre, aunque en menor medida en comparación con los tratamientos Devastor.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), el aumento en el contenido de cobre fue más moderado en comparación con los otros herbicidas. T31 disminuyó ligeramente de 3.928 ppm a 3.772 ppm, T32 mostró un aumento de 3.372 ppm a 3.956 ppm, y T33 aumentó de 3.524 ppm a 3.708 ppm. Iguana parece tener un efecto más equilibrado en el contenido de cobre en el suelo, sin los incrementos pronunciados observados con los otros herbicidas.

En general, todos los tratamientos con herbicidas mostraron un aumento en el contenido de cobre, siendo Devastor y Itasato los que tuvieron un mayor impacto. Iguana, por otro lado, mostró un efecto menos pronunciado, con cambios más pequeños en el contenido de cobre. El testigo (To) también presentó un aumento en el cobre, aunque de menor magnitud en comparación con los tratamientos con herbicidas. Esto sugiere que los herbicidas, especialmente Devastor, podrían estar contribuyendo a la movilización de cobre en el suelo.

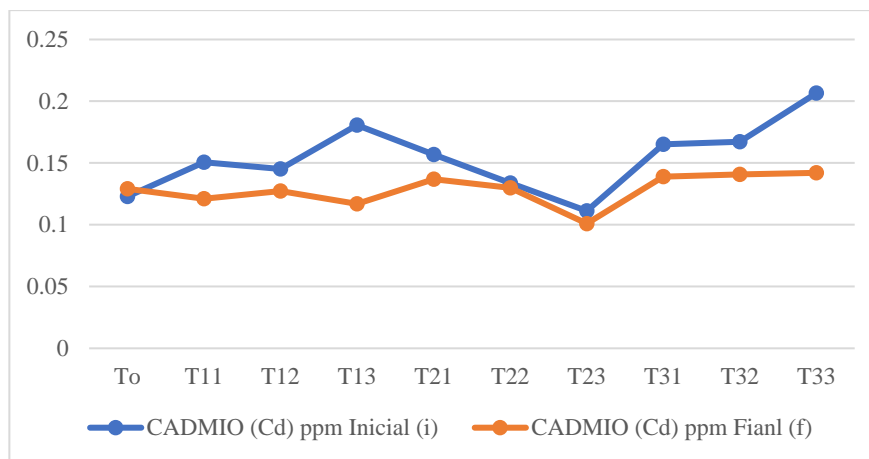


Figura 36. Comparación inicial y final de resultado de Cadmio.

La Figura 36 muestra los valores iniciales y finales del contenido de cadmio (Cd) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un ligero aumento en el contenido de cadmio, pasando de 0.1229 ppm a 0.129 ppm. Este incremento podría estar relacionado con factores naturales del suelo, como la liberación gradual de cadmio debido a la actividad biológica o cambios en las propiedades físicas del suelo.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), el comportamiento fue variable. T11 mostró una disminución en el contenido de cadmio, pasando de 0.1506 ppm a 0.121 ppm. T12 también experimentó una ligera disminución, de 0.1452 ppm a 0.1273 ppm. T13 presentó la mayor reducción, pasando de 0.1808 ppm a 0.117 ppm. Estos descensos podrían sugerir que Devastor puede estar afectando la movilidad o la disponibilidad de cadmio en el suelo, lo que podría ser consecuencia de la alteración de la estructura del suelo por el herbicida.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), los cambios fueron más moderados. T21 disminuyó ligeramente de 0.1568 ppm a 0.137 ppm, T22 pasó de 0.1339 ppm a 0.13 ppm, y T23 mostró la menor variación, pasando de 0.1112 ppm a 0.101 ppm. Estos resultados sugieren que Itasato tiene un efecto menos pronunciado en la movilidad del cadmio en comparación con Devastor, con una reducción más estable en su concentración.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), también se registraron reducciones en el contenido de cadmio, aunque con variaciones menores. T31 pasó de 0.1652 ppm a 0.139 ppm, T32 mostró una disminución de 0.1672 ppm a 0.1408 ppm, y T33 bajó de 0.2066 ppm a 0.1421 ppm. Iguana parece tener un efecto similar al de Itasato,

con una reducción en el cadmio, aunque menos pronunciada que en los tratamientos con Devastor.

En general, todos los tratamientos con herbicidas, incluido el testigo, mostraron una disminución o una variación mínima en el contenido de cadmio. Devastor tuvo el mayor efecto, con reducciones significativas, mientras que Itasato e Iguana mostraron un comportamiento más moderado. Las variaciones en los tratamientos pueden estar asociadas a la interacción de los herbicidas con las características del suelo, que afectan la disponibilidad de cadmio.

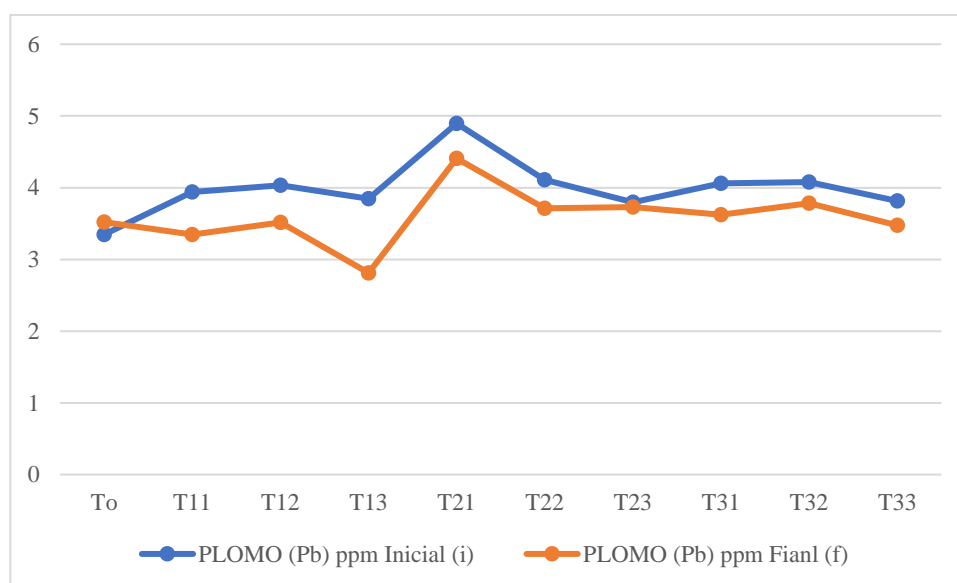


Figura 37. Comparación inicial y final de resultado de plomo.

La Figura 37 muestra los valores iniciales y finales del contenido de plomo (Pb) en el suelo, expresado en ppm, para diferentes tratamientos con herbicidas. En el testigo (To), se observó un ligero aumento en el contenido de plomo, pasando de 3.348 ppm a 3.522 ppm. Este incremento podría ser atribuido a procesos naturales de alteración del suelo o a la movilización de plomo debido a factores ambientales como la lixiviación.

En los tratamientos con el herbicida Devastor (T11, T12, T13), el comportamiento fue variable. T11 mostró una disminución del contenido de plomo, pasando de 3.94 ppm a 3.344 ppm. T12 también experimentó una ligera reducción, de 4.032 ppm a 3.516 ppm. T13 presentó la mayor disminución, pasando de 3.844 ppm a 2.812 ppm. Este cambio significativo podría indicar que Devastor tiene un impacto mayor en la disminución de plomo, posiblemente alterando la estructura del suelo o facilitando la movilización de este metal.

En los tratamientos con el herbicida Itasato (T21, T22, T23), también se observaron reducciones, aunque menos pronunciadas. T21 pasó de 4.896 ppm a 4.408 ppm, T22 de 4.108 ppm a 3.712 ppm, y T23 de 3.796 ppm a 3.732 ppm. Estos resultados indican que Itasato puede estar afectando la disponibilidad de plomo en el suelo, pero con una reducción más moderada en comparación con Devastor.

En los tratamientos con el herbicida Iguana (T31, T32, T33), se registraron ligeras disminuciones en el contenido de plomo. T31 pasó de 4.06 ppm a 3.624 ppm, T32 de 4.08 ppm a 3.785 ppm, y T33 de 3.816 ppm a 3.476 ppm. Iguana parece tener un efecto similar al de Itasato, con una reducción moderada del plomo en comparación con Devastor.

En general, todos los tratamientos con herbicidas, incluido el testigo, mostraron una disminución en el contenido de plomo. Devastor presentó la mayor reducción en el contenido de plomo, mientras que Itasato e Iguana tuvieron un impacto más moderado. Las variaciones observadas en los tratamientos pueden estar asociadas a la interacción de los herbicidas con las propiedades del suelo, lo que influye en la movilidad y disponibilidad del plomo en el entorno.

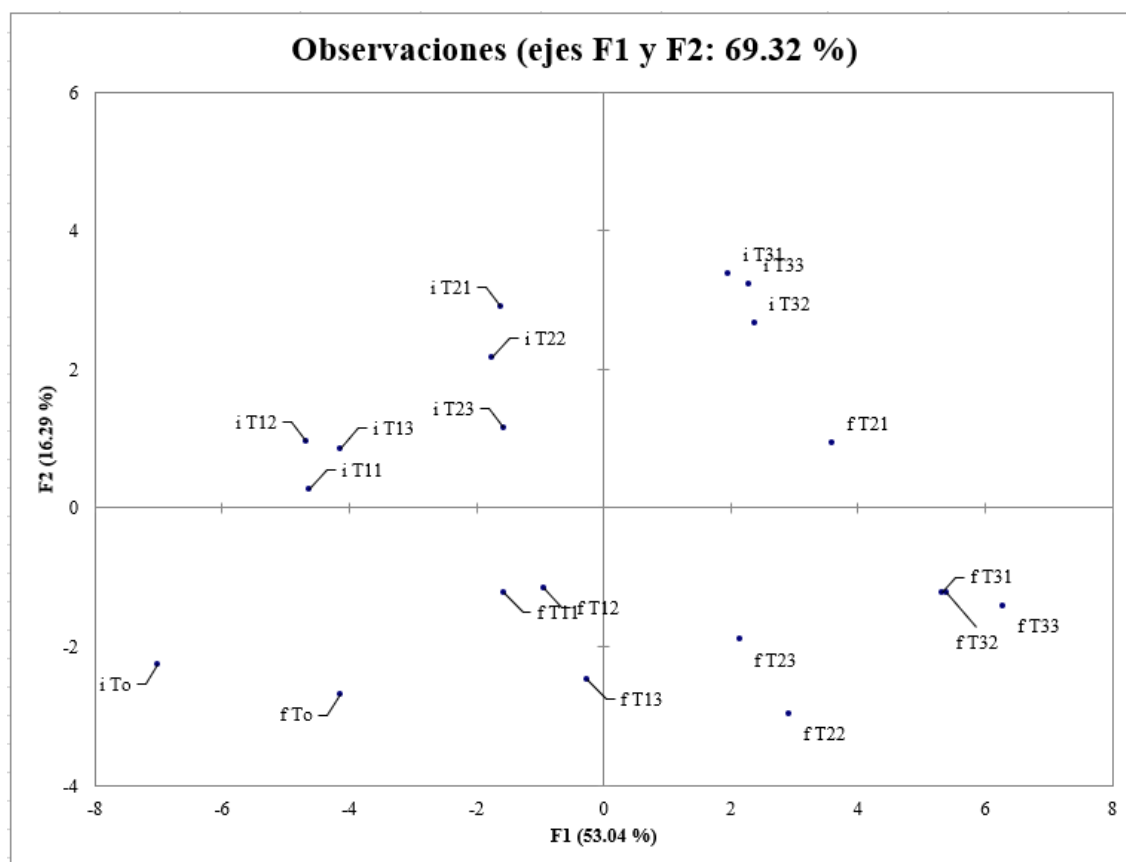


Figura 38. Observaciones del análisis de componentes principales (PCA), para las muestras iniciales y finales.

La Figura 38 muestra las observaciones en un análisis de componentes principales (PCA), con los ejes F1 y F2 explicando un 69,32% de la variación total de los datos. Este análisis permite identificar cómo las muestras iniciales (i) y finales (f) se agrupan y cómo los tratamientos afectan las propiedades del suelo. Las observaciones están separadas en cuatro cuadrantes, con claras diferencias entre las muestras iniciales (i) y finales (f).

Las observaciones correspondientes al testigo (To), las muestras iniciales (i To) y finales (f To) están muy próximas en el gráfico, lo que indica que el suelo sin tratamiento experimentó pocos cambios significativos en las variables, validando su función como control en el experimento. En cuanto a los tratamientos, los efectos son diversos según el herbicida utilizado.

Para el tratamiento con Devastor (T11, T12, T13), las muestras iniciales (i T11, i T12, i T13) están agrupadas en el cuadrante superior izquierdo, pero las finales (f T11, f T12, f T13) se desplazan hacia el cuadrante inferior izquierdo, lo que sugiere que este herbicida provocó cambios específicos en las propiedades del suelo representadas en esta región del espacio multivariado.

Por otro lado, el tratamiento con Itasato (T21, T22, T23) presenta muestras iniciales (i T21, i T22, i T23) en el cuadrante superior izquierdo con cierta dispersión, pero sus finales (f T21, f T22, f T23) se trasladan hacia los cuadrantes inferiores, indicando un impacto notable del herbicida en las propiedades del suelo.

En el caso del Iguana (T31, T32, T33), las muestras iniciales (i T31, i T32, i T33) se agrupan en el cuadrante superior derecho, mientras que las finales (f T31, f T32, f T33) se desplazan hacia el cuadrante inferior derecho, mostrando un efecto significativo y consistente de este herbicida en las variables estudiadas.

La distancia entre los puntos iniciales (i) y finales (f) refleja la magnitud del cambio en las propiedades del suelo, donde los tratamientos que muestran mayores desplazamientos, como Iguana, indican un impacto más fuerte en las características medidas. Este análisis permite observar que cada tratamiento genera un patrón específico de cambio en las propiedades del suelo, y que el herbicida Iguana parece tener un impacto más marcado y consistente, seguido por Itasato y Devastor. Además, el eje F1, que explica el 53,04% de la variación, captura cambios generales en el suelo debido a los tratamientos, mientras que el eje F2, con un 16,29%, refleja variaciones adicionales relacionadas con las propiedades específicas del suelo o diferencias entre herbicidas.

En general, el análisis de componentes principales muestra cómo los tratamientos con herbicidas alteran las propiedades químicas y físicas del suelo, con patrones de impacto distintos según el tratamiento. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las formulaciones químicas de los herbicidas y sus modos de acción. Como era de esperar, el testigo muestra una estabilidad relativa en comparación con los suelos tratados.

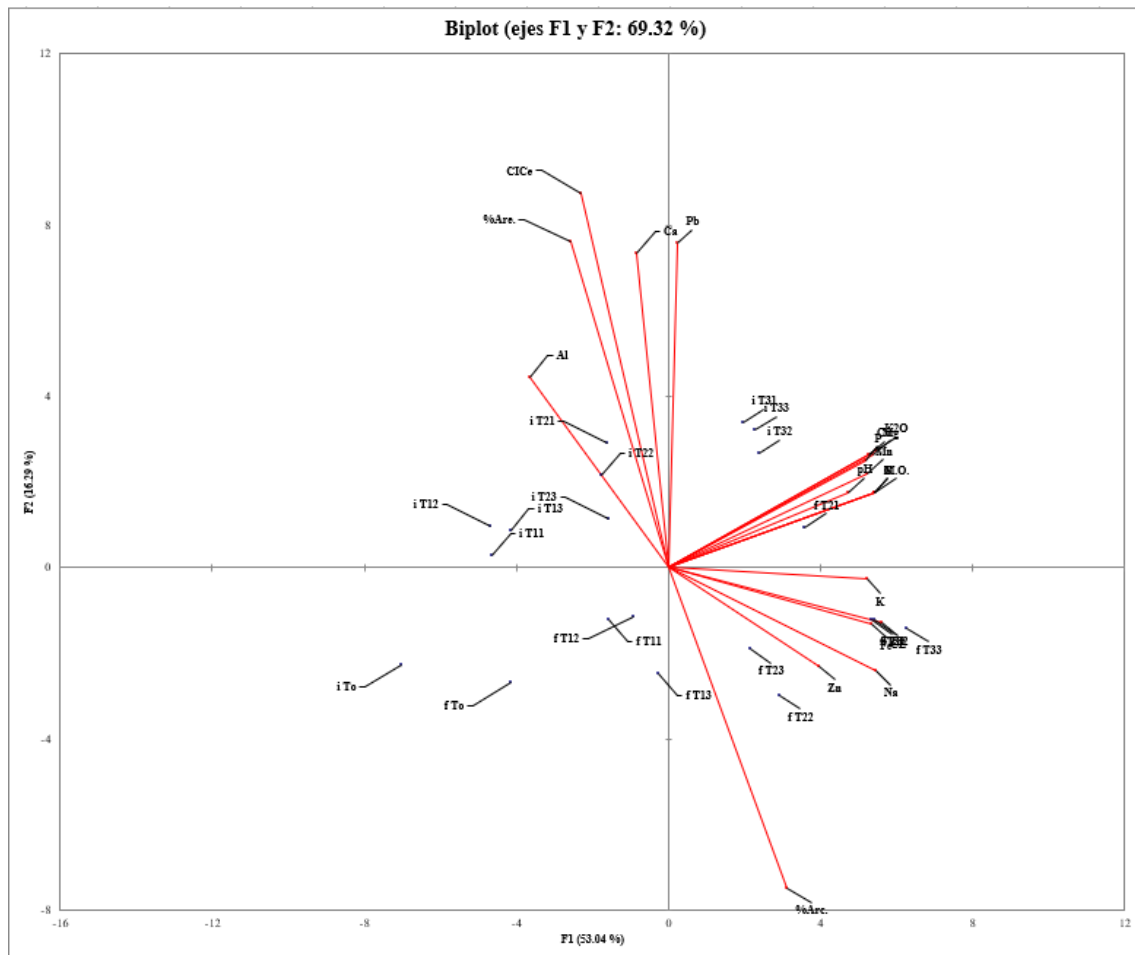


Figura 39. Análisis de componentes principales (PCA) basado en los parámetros y metales (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) general para la comparación de las muestras antes y después del tratamiento.

La Figura 39 muestra un análisis de componentes principales (PCA) basado en los metales Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb, con los ejes F1 y F2 explicando un 69,32% de la variación total. Este análisis revela cómo los tratamientos herbicidas modifican las propiedades químicas del suelo en relación con estos metales, lo cual permite evaluar los impactos de los diferentes manejos del suelo. A continuación, se detalla el comportamiento de estos metales en conjunto y en relación con los tratamientos:

Los vectores correspondientes a Fe, Zn y Cu están claramente orientados hacia el cuadrante inferior derecho, destacando su asociación con las observaciones finales del

tratamiento Iguana (f T31, f T32, f T33). Esto sugiere que este tratamiento genera un aumento significativo en la disponibilidad de estos metales, probablemente debido a cambios en el pH, la materia orgánica o la capacidad de intercambio catiónico (CIC). La fuerte contribución de estos metales al eje F1 (53,04% de la variación) indica que los cambios generales en el suelo están dominados por su dinámica. Por su parte, el Mn se orienta hacia el cuadrante inferior izquierdo, más cercano a las observaciones iniciales y testigos, lo que refleja su relativa estabilidad y menor sensibilidad a los tratamientos aplicados.

En cuanto al Cd y el Pb, sus vectores son más cortos y están orientados hacia el cuadrante superior derecho, indicando una baja contribución a la variabilidad explicada por los componentes principales. Esto evidencia que estos metales no experimentan cambios significativos debido a los herbicidas, probablemente debido a su baja movilidad en el suelo. Su estabilidad está asociada con características intrínsecas del suelo, como la textura o el contenido de materia orgánica.

Los tratamientos herbicidas muestran un impacto diferenciado en los metales analizados. El tratamiento Iguana genera los mayores cambios, incrementando notablemente la disponibilidad de Fe, Zn y Cu. El tratamiento Itasato tiene un efecto moderado, mientras que Devastor muestra una mínima alteración en las concentraciones de los metales, reflejando una menor interacción con las propiedades químicas del suelo.

En términos generales, el PCA sugiere que los metales Fe, Zn y Cu son los más sensibles a las modificaciones inducidas por los tratamientos herbicidas, mientras que Mn, Cd y Pb muestran una mayor estabilidad. Esto destaca la importancia de monitorear los niveles de Fe, Zn y Cu, ya que un exceso podría generar toxicidad, mientras que la estabilidad de Mn, Cd y Pb es beneficiosa para la sostenibilidad del suelo. La interpretación de estos resultados refuerza la necesidad de manejar los herbicidas de manera cuidadosa para evitar impactos negativos en la calidad del suelo y la salud ambiental.

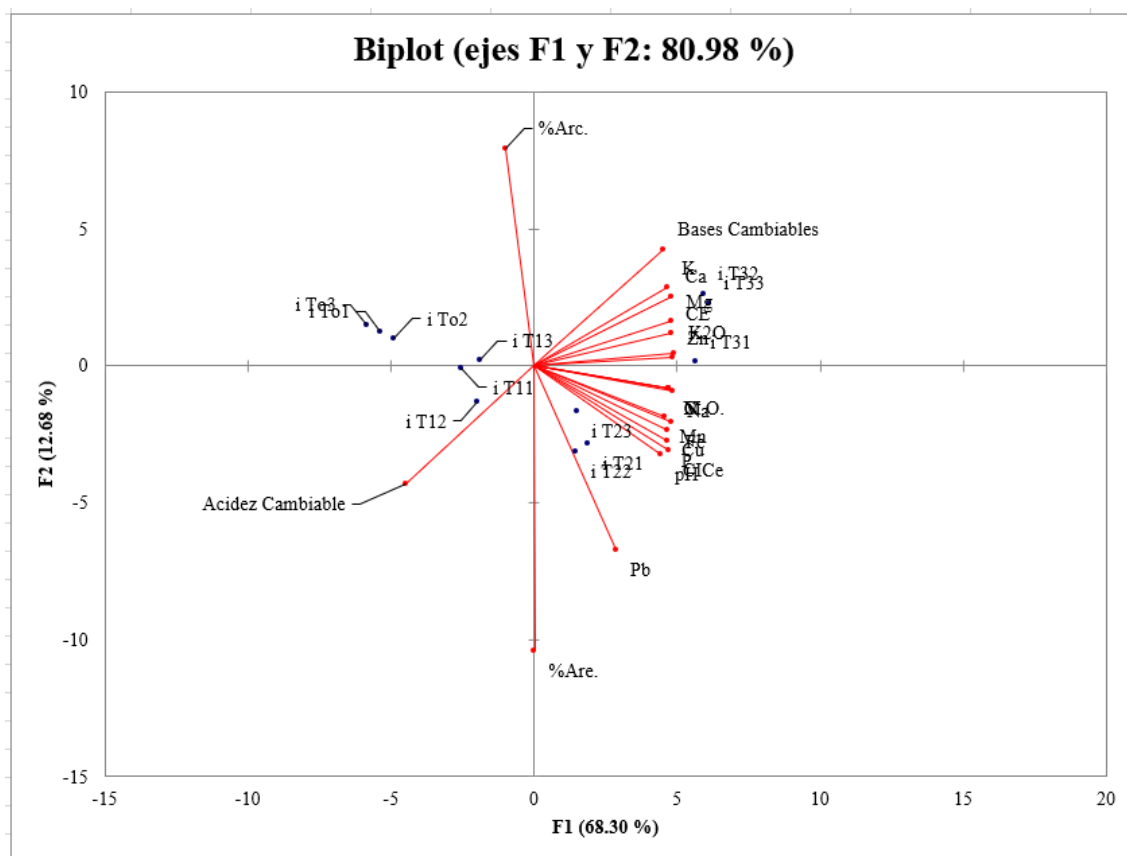


Figura 40. Análisis de componentes principales (PCA) basado en los parámetros y metales (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) general para la comparación de las muestras antes del tratamiento.

En la Figura 40 se muestra el biplot presentado, donde los ejes principales F1 (68.30%) y F2 (12.68%) explican conjuntamente el 80.98% de la variación total, se identifican las relaciones entre las propiedades químicas del suelo, la textura y los metales pesados (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) en función de los tratamientos aplicados. Este análisis revela patrones específicos que reflejan el impacto de los diferentes tratamientos sobre las propiedades del suelo.

El eje F1, que explica la mayor parte de la variación, está positivamente correlacionado con variables como bases cambiables (Ca, Mg, K), pH, materia orgánica (MO), Zn, y Mn, lo que indica que estos parámetros aumentan principalmente en los suelos tratados, asociados a mejoras en la fertilidad. En contraste, el porcentaje de arena (%Are) y el metal pesado Pb están negativamente correlacionados con este eje, lo que sugiere que suelos con mayor contenido de arena o concentraciones elevadas de Pb presentan características opuestas, relacionadas con una menor calidad química.

El eje F2, que explica un 12.68% de la variación, refleja diferencias asociadas con la acidez cambiante y el porcentaje de arcilla (%Arc), además de una leve relación con los metales Cu y Cd, lo que implica que estos parámetros están influenciados por la textura y la acidez del suelo.

Los tratamientos aplicados muestran diferencias notables en su efecto sobre las propiedades del suelo. Las muestras correspondientes al tratamiento Iguana (iT31, iT32, iT33) se agrupan en el cuadrante superior derecho, lo que sugiere un efecto positivo significativo, asociado a incrementos en bases cambiables, Zn, y Mn, además de una mejora general en las características químicas del suelo. En comparación, el tratamiento Itasato (iT21, iT22, iT23) presenta un impacto moderado, con incrementos en variables como el pH y los metales Fe y Zn, aunque los cambios son menos marcados que en Iguana. Por otro lado, el tratamiento Devastor (iT11, iT12, iT13) muestra una influencia limitada, con un efecto mínimo en la acidez cambiante y otras propiedades clave del suelo, mientras que el testigo (To) muestra estabilidad, sirviendo como referencia de control.

En relación con los metales pesados, se observa que Zn y Mn son los más afectados positivamente por los tratamientos, especialmente con Iguana, que potencia su disponibilidad en el suelo. Fe también muestra una mejora asociada a los tratamientos, aunque con un menor impacto relativo. Los metales Cu y Cd tienen una asociación más moderada con los ejes principales, indicando que su comportamiento está más relacionado con las características texturales y la acidez del suelo. En el caso de Pb, se observa una compensación negativa con F1, indicando que su concentración disminuye en los suelos tratados, lo que puede interpretarse como un efecto positivo en la reducción de este contaminante.

En general, el análisis de componentes principales permite identificar que el tratamiento Iguana genera el impacto más significativo y positivo en las propiedades químicas y texturales del suelo, seguido de Itasato con un efecto intermedio, mientras que Devastor muestra un impacto menor. Las mejoras en parámetros como las bases cambiables, la materia orgánica, el pH y la reducción de metales contaminantes como Pb reflejan la eficacia de los tratamientos, especialmente Iguana, en la mejora de la calidad del suelo. Estos resultados son fundamentales para diseñar estrategias de manejo sostenible del suelo, optimizando su fertilidad y reduciendo la contaminación por metales pesados.

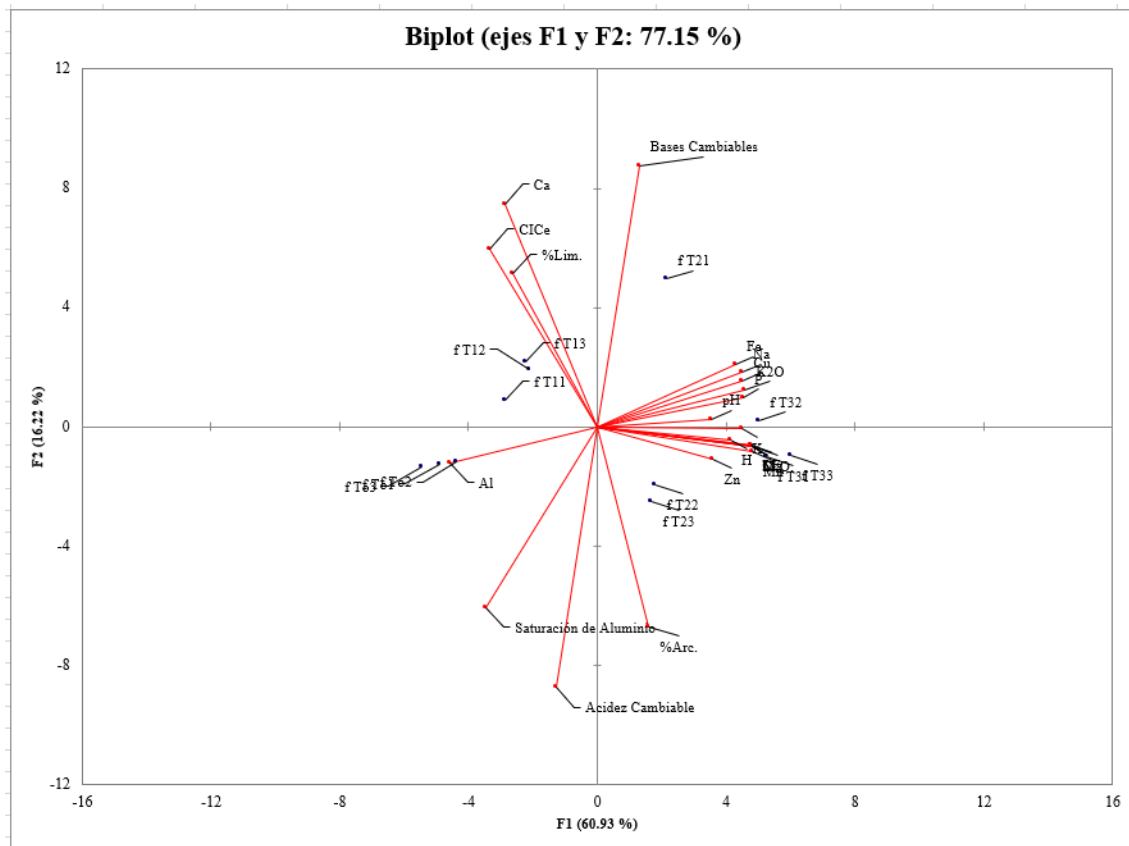


Figura 41. Análisis de componentes principales (PCA) basado en los parámetros y metales (Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb) general para la comparación de las muestras después del tratamiento.

En la figura 41 nos muestra el análisis del biplot generado con los ejes F1 (60.93%) y F2 (16.12%), que en conjunto explican el 77.15% de la variabilidad de los datos, se observa la relación entre las concentraciones de Fe, Zn, Mn, Cu, Cd, Pb y diversas propiedades del suelo, como el pH, acidez cambiante y bases cambiables. Este análisis proporciona información crucial para entender cómo estos metales afectan la calidad del suelo y la fertilidad, así como las interacciones que ocurren entre ellos. Fe (Hierro) se encuentra en el cuadrante negativo de F1, lo que indica que su concentración está más asociada con suelos con mayor acidez y menor presencia de bases cambiables. En estos suelos más ácidos, los metales como Fe y Mn tienden a solubilizarse, lo que puede resultar en una mayor disponibilidad para las plantas, pero también en un riesgo de toxicidad.

La presencia de Fe en este cuadrante sugiere que los tratamientos como Devastor (T11, T12, T13), que se encuentran en la región negativa de F1, podrían estar favoreciendo una mayor solubilización de Fe, lo cual puede ser perjudicial para la salud de las plantas en niveles elevados. Zn (Zinc) está claramente relacionado con suelos más fértiles y con una mejor disponibilidad en los tratamientos de Iguana (T31, T32, T33), ubicados en la

región positiva de F1. Esto sugiere que estos tratamientos favorecen la presencia de bases cambiables y un pH más adecuado, lo que facilita la absorción de Zn. Dado que Zn es un metal esencial para el crecimiento vegetal, su alta disponibilidad en estos tratamientos indica un ambiente favorable para el desarrollo de las plantas. Mn (Manganeso), al igual que el Fe, se encuentra en el cuadrante negativo de F1, lo que indica que su concentración aumenta en suelos ácidos.

En niveles elevados, el Mn puede ser tóxico para las plantas, especialmente en suelos con pH bajo. Esta relación sugiere que los suelos más ácidos, asociados con los tratamientos negativos de F1, podrían estar favoreciendo la disponibilidad de Mn en forma solubilizada, lo que podría tener efectos negativos en la salud del suelo.

Cu (Cobre) sigue una tendencia similar a la del Fe y Mn, estando también en el cuadrante negativo de F1. Esto refleja que, al igual que los otros metales en este grupo, el Cu se vuelve más soluble en suelos ácidos. En altas concentraciones, el Cu puede afectar negativamente a las plantas, inhibiendo la absorción de otros nutrientes esenciales. Su presencia en los tratamientos más ácidos podría indicar un riesgo potencial de toxicidad.

Cd (Cadmio), como los otros metales pesados, se asocia con suelos más ácidos. En suelos con pH bajo, el Cd puede movilizarse y volverse más disponible, lo que incrementa su riesgo de toxicidad. Sin embargo, en el biplot no se muestra con la misma intensidad que los demás metales, lo que podría sugerir una menor movilidad o concentración en los tratamientos analizados.

Pb (Plomo) también se encuentra en el cuadrante negativo de F1, lo que indica su asociación con suelos más ácidos. Al igual que el Fe, Mn y Cu, el Pb tiende a solubilizarse en condiciones ácidas, lo que aumenta su disponibilidad y puede generar efectos tóxicos en las plantas si las concentraciones son elevadas. Los tratamientos en la región negativa de F1, como Devastor, pueden estar contribuyendo a una mayor presencia de Pb en el suelo, lo que podría afectar negativamente la calidad del ambiente edáfico.

El eje F1, que explica el 60.93% de la variabilidad, está relacionado principalmente con la presencia de bases cambiables y la mayor fertilidad del suelo. En la parte positiva de F1, los tratamientos de Iguana (T31, T32, T33) muestran un entorno favorable para la absorción de Zn, lo que sugiere una mejora en la fertilidad y un ambiente más equilibrado para el crecimiento vegetal. Estos tratamientos también están asociados con una menor concentración de metales pesados solubles, lo que mejora la calidad del suelo y reduce el

riesgo de toxicidad. Por el contrario, el eje F2, que explica el 16.12% de la variabilidad, está asociado con la acidez cambiante y las concentraciones elevadas de metales pesados.

Los tratamientos en la parte negativa de F1, como Devastor (T11, T12, T13), están vinculados a suelos más ácidos, lo que favorece la solubilización de metales como Fe, Zn, Mn, Cu, Pb y Cd. En estos suelos, los metales pesados pueden volverse más disponibles, lo que incrementa el riesgo de toxicidad y limita la fertilidad del suelo. Para optimizar la salud del suelo y reducir la toxicidad por metales pesados, es importante manejar el pH y las concentraciones de bases cambiables para evitar condiciones excesivamente ácidas que favorezcan la solubilización de metales como Fe y Pb.

Este análisis destaca la importancia de un manejo adecuado de la acidez del suelo y las concentraciones de metales pesados para mantener un entorno saludable para las plantas y mejorar la productividad del suelo.

4.4. Cumplimiento con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas

Las concentraciones de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en las muestras comparándolas con los valores establecidos por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para uso agrícola:

Tabla 4. Comparación de Cd y Pb con el ECA para suelo agrícola.

Muestra	Cd (ppm)	Cumple ECA Cd	Pb (ppm)	Cumple ECA Pb
i To	0,123	Sí	3,348	Sí
i T11	0,151	Sí	3,940	Sí
i T12	0,145	Sí	4,032	Sí
i T13	0,181	Sí	3,844	Sí
i T21	0,157	Sí	4,896	Sí
i T22	0,134	Sí	4,108	Sí
i T23	0,111	Sí	3,796	Sí
i T31	0,165	Sí	4,060	Sí

Muestra	Cd (ppm)	Cumple ECA Cd	Pb (ppm)	Cumple ECA Pb
i T32	0,167	Sí	4,080	Sí
i T33	0,207	Sí	3,816	Sí
f To	0,129	Sí	3,522	Sí
f T11	0,121	Sí	3,344	Sí
f T12	0,127	Sí	3,516	Sí
f T13	0,117	Sí	2,812	Sí
f T21	0,137	Sí	4,408	Sí
f T22	0,130	Sí	3,712	Sí
f T23	0,101	Sí	3,732	Sí
f T31	0,139	Sí	3,624	Sí
f T32	0,141	Sí	3,785	Sí
f T33	0,142	Sí	3,476	Sí

Cadmio (Cd), todas las muestras presentan concentraciones de cadmio muy inferiores al límite permitido de 1,4 mg/kg. Esto indica que los suelos no tienen contaminación significativa por este metal. Las concentraciones oscilan entre 0,101 mg/kg (f T23) y 0,207 mg/kg (i T33), lo que refleja una baja variabilidad y uniformidad en las muestras.

Plomo (Pb), las concentraciones de plomo en todas las muestras son considerablemente menores al límite establecido de 70 mg/kg. Esto asegura que los suelos no presentan riesgos por este elemento. Todas las muestras cumplen ampliamente con los estándares establecidos por el ECA para uso agrícola.

Esto indica que los suelos evaluados son aptos para actividades agrícolas y no presentan riesgos de contaminación por cadmio ni plomo. La estabilidad en las

concentraciones también sugiere una composición homogénea de los suelos en cuanto a estos metales pesados.

Las concentraciones de cadmio en los suelos tratados con Itasato, Devastor e Iguana fueron de 0.072 ppm, 0.032 ppm y 0.012 ppm, respectivamente. Según Mendoza et al. (2021), las concentraciones de Cd en suelos sometidos al uso intensivo de fertilizantes fosfatados se incrementaron notablemente, llegando a niveles que excedían los límites establecidos. En contraste, en este estudio, los niveles de cadmio fueron menores, posiblemente por las diferencias en el manejo agrícola y el tipo de insumos químicos. En otro contexto, Huamaní (2012) reportó valores promedio de Cd en suelos de cacao de 0.53 ppm, significativamente más altos que los obtenidos en Villa Rica, sugiriendo un menor impacto histórico de agroquímicos en esta región.

Los resultados de este estudio destacan una relación inversa entre el pH del suelo y la presencia de Cd, consistente con hallazgos de Kabata-Pendias (2011), quien señaló que en suelos ácidos el Cd se vuelve más móvil y biodisponible. En este contexto, el manejo del pH es crucial para mitigar la contaminación por metales traza.

Según los resultados obtenidos en esta investigación, las concentraciones de plomo (Pb) en los suelos tratados con herbicidas oscilaron entre 2.812 ppm y 4.408 ppm después de los tratamientos, valores significativamente inferiores al límite establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas en Perú, que es de 70 ppm. En comparación con el estudio de Solórzano et al. (2015), quienes reportaron un contenido promedio de plomo no superior a 5 ppm en suelos de parcelas de cacao en la región de Ucayali, los resultados de Villa Rica se encuentran dentro de un rango similar, lo que indica que el uso de herbicidas en esta zona no ha generado una acumulación preocupante de este metal pesado.

En este contexto, es relevante señalar que, aunque las concentraciones de Pb permanecen dentro de límites seguros, las variaciones entre tratamientos sugieren que los herbicidas podrían influir en su movilidad o disponibilidad en el suelo. Por ejemplo, los tratamientos con Devastor mostraron la mayor reducción en el contenido de plomo, alcanzando valores finales de 2.812 ppm, mientras que Itasato e Iguana presentaron disminuciones más moderadas. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que asocian la solubilización de metales pesados como el plomo con cambios en

las propiedades químicas del suelo, como el pH y la acidez cambiante, aspectos clave en la interacción entre el suelo y los agroquímicos aplicados (Kabata-Pendias, 2011).

La comparación con estudios como el de Calderón & Rozo (2012), quienes enfatizaron la importancia de monitorear la movilización de metales como el Pb en sistemas de cacao, refuerza la necesidad de considerar tanto las características intrínsecas del suelo como los insumos químicos utilizados en el manejo agrícola. Este enfoque integral no solo permite evaluar el impacto inmediato de los herbicidas, sino también diseñar estrategias de manejo sostenible que minimicen riesgos a largo plazo.

Alloway (2013) y McBride (1994) subrayan la importancia de los óxidos de hierro y manganeso como reguladores de la movilidad de Zn y Cu. Esto sugiere que las características del suelo en Villa Rica podrían influir en la biodisponibilidad de estos metales y su interacción con los herbicidas aplicados.

La influencia de herbicidas en la presencia de metales traza, con impactos diferenciados según el producto utilizado. Los datos coinciden parcialmente con estudios previos, destacando la importancia del manejo del pH y el control del uso de agroquímicos para reducir la contaminación metálica. La comparación evidencia la necesidad de estudios adicionales para explorar la dinámica de otros metales y validar tendencias a largo plazo.

V. CONCLUSIONES

- El porcentaje de arena disminuyó significativamente en los tratamientos, siendo más pronunciado en los suelos tratados con Devastor y menos en los tratados con Iguana, mientras que los porcentajes de arcilla y limo aumentaron.
- El análisis de los parámetros químicos revela que el pH del suelo aumentó levemente en los tratamientos con herbicidas, lo que podría estar relacionado con la acidificación inducida por los productos aplicados. Asimismo, la conductividad eléctrica aumentó significativamente, con mayores incrementos en los tratamientos con Iguana, indicando un incremento en la concentración de sales solubles en el suelo.
- El cadmio presentó una disminución general, con valores finales de 0.072 ppm en suelos tratados con Itasato, 0.032 ppm con Devastor y 0.012 ppm con Iguana. El plomo mantuvo concentraciones estables dentro del rango de 2.812 ppm a 4.408 ppm; manganeso, cobre y zinc mostraron variaciones que se correlacionaron con cambios en los parámetros químicos del suelo, especialmente el pH y la capacidad de intercambio catiónico
- Las concentraciones de cadmio y plomo en los suelos agrícolas tratados con herbicidas cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas en Perú, establecidos en 1.4 ppm para cadmio y 70 ppm para plomo.

VI. PROPUESTA A FUTURO

- Además de los metales analizados en este estudio (Cd, Pb, Zn, Mn, Cu), sería valioso incluir otros elementos como arsénico (As), mercurio (Hg) y níquel (Ni), que también están relacionados con el uso de agroquímicos. Asimismo, investigar contaminantes emergentes asociados a los herbicidas utilizados podría aportar una perspectiva más completa sobre su impacto ambiental.
- Realizar estudios de la historia del suelo agrícola anteriormente para poder saber que tan contaminada se encuentra el suelo.
- Implementar un monitoreo a largo plazo de los suelos tratados con herbicidas para evaluar la acumulación de metales traza y los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo con el tiempo. Esto permitiría identificar posibles efectos crónicos no detectables en un análisis puntual.
- Investigar cómo los herbicidas afectan la actividad microbiana del suelo y su papel en la movilización o estabilización de metales traza. Este enfoque podría proporcionar información sobre la resiliencia del suelo frente al impacto de los agroquímicos.
- Incluir el análisis de técnicas agrícolas sostenibles, como el uso de cultivos de cobertura, prácticas de agroforestería o métodos de control biológico, para reducir la dependencia de herbicidas y mitigar su impacto ambiental.
- Evaluar cómo los metales traza presentes en el suelo son absorbidos por las plantas (en este caso, *Theobroma cacao* L.) y su potencial movilidad hacia cuerpos de agua subterránea. Este análisis es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y la calidad ambiental.
- Replicar esta investigación en diferentes regiones con variabilidad en suelos, clima y prácticas agrícolas para entender cómo estas variables influyen en la dinámica de los herbicidas y los metales traza.
- Utilizar herramientas como la espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) o técnicas de imagen geoquímica para una caracterización más precisa de los metales traza y su distribución espacial en el suelo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer Science & Business Media.
- Barba, V. (2019). *DISIPACIÓN DE HERBICIDAS EN UN SUELO ENMENDADO CON RESIDUOS ORGÁNICOS: ENSAYOS EN CAMPO E IMPACTO EN LAS COMUNIDADES MICROBIANAS DEL SUELO [Tesis para optar grado de Doctor, UNIVERSIDAD DE SALAMANCA]*. Repositorio de la universidad de salamanca.
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151–163.
- Betty Mendoza, D. T. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *Tecnológicas*, 51.
doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.1738>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall.
- Caiza, F. (2018). MERCURIO EN EL SUELO CONTAMINACIÓN Y REMEDIACIÓN . *UNIVERSIDAD COMPLUTENSE* .
- Calderón, A., & Roza, E. (2012). Análisis de la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao. *ESTUDIO DE METALES PESADOS EN PLANTACIONES DE CACAO*, 1-27.
- Calderón, C., Bautista, G., & Rojas, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 141-157.
doi:<https://doi.org/10.22579/20112629.524>
- Cordova, A., & Farfan, O. (2022). Concentración de Cadmio en suelo, hojas y almendras de cacao en dos plantaciones de la Provincia de El Oro. *UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA*.
- Fageria, N. K. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269-1290.

- FAO. (2024). Portal de Suelos de la FAO. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Forero, E., Serrano, A., & Balaguera, A. (2009). El aluminio en el suelo y algunas estrategias de manejo. *Ciencia y agricultura*, 19-28.
- Foy, C. D. (1984). Physiological effects of aluminum on plant growth. *Plant and Soil*, 76(1), 71-82.
- Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *revista de la sociedad española de mineralogía*, 49.
- García, C., Moreno, L., Hernández, T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente.*, 125-138.
- General, A. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. UN. (*European Commission and Directorate-General for Environment, 2021*).
- Gonzales, P. (2019). Función y toxicidad de los ingredientes activos. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Asesoría Técnica Parlamentaria*.
- Hasan, M. R., Khan, M., Khan, M., Aktar, S., Rahman, M., Hossain, F., & Hasan, A. (2016). Distribución de metales pesados y contaminación en aguas superficiales de la costa de la Bahía. *Ciencia ambiental convincente*, 1-12.
doi:<http://dx.doi.org/10.1080/23311843.2016.1140001>
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Pearson Education.
- Herrera, T. (2008). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *La Academia*.
- Hinacpié, W. (2019). *ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN LA FASE SÓLIDA DEL SUELO DEL AGROECOSISTEMA EN AQUITANIA, BOYACÁ [Tesis pregrado; Universidad de La Salle]*. Repositorio de la universidad la salle.
- Hugo Alfredo Huamaní, M. á. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 339-344.

- Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). LA MATERIA ORGÁNICA, IMPORTANCIA Y EXPERIENCIA DE SU USO EN LA AGRICULTURA. *IDESIA*, 49-61. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press.
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Lal, R. (2015). Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(3), 55A–62A.
- López, J., Barbazán, M., & Ernst, O. (2015). Conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo en un suelo agrícola con reducida variabilidad en propiedades físico-químicas. *Agrociencia Uruguay*, 102-111.
- Martínez, S., Andreo, P., Pérez, C., & Martínez, J. (2021). Mineralogía y dinámica del arsénico. *Campus Mare Nostrum*, 257-265.
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of Plant Nutrition*. Springer.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM). (2017). Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos. Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano
- Moreno, M. (2018). *LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR PLOMO Y SUS CONSECUENCIAS SOBRE LA SALUD HUMANA*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE.
- N.Defargea, J.SpirouxdeVendômoisb, & G.E.Séralinia. (2018). Toxicityofformulantsandheavymetalsinglyphosate-basedherbicidesand otherpesticides. *ToxicologyReports*, 156-163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025>
- Novello, A., & Quintero, C. (2007). Contenidos de fosforo total en suelos del distrito Villa Eloisa (Santa Fe). *Informaciones Agronómicas*, 11-15.
- Porta Casanellas, J. L.-A. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*.

- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2001). Use of saline-sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils. *Agricultural Water Management*, 50(3), 197-210.
- Rucks, L., Garcia, F., Kaplan, A., Ponce, J., & Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo. *FACULTAD DE AGRONOMÍA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA*.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2000). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176.
- Sparks, D. L. (2000). Bioavailability of soil potassium. In *Handbook of Soil Science* (pp. 81-96). CRC Press.
- Stewart, W. M., & Roberts, T. L. (2012). Potassium and its role in agriculture. *Advances in Agronomy*, 117, 186-232.
- Solórzano, F. C., Grandez, C. E., & Zuñiga, E. D. (2015). *PRESENCIA DE METALES PESADOS EN SUELOS DE PLANTACIONES DE CACAO (Theobroma cacao L.) EN LA REGIÓN UCAYALI*. Ucayali.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- VEDA OBANDO, B. (2021). *METALES TRAZA (As, Cr, Cd, Co, Ni, Pb) EN PLANTACIONES BANANERAS DE COSTA RICA Y EFECTO DEL CROMO EN EL CRECIMIENTO Y LA ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN LA PLANTA DE BANANO (Musa AAA) [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD DE COSTA RICA]*. Repositorio de la Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10669/84420>
- Viera, M. T., & Anteparra, M. E. (2019). Efecto de tres herbicidas totales de diferente acción y dosis en malezas de cacao (*Theobroma cacao L.*), Tingo Maria. *Manuel Tito Viera Huiman, Miguel Eduardo Anteparra Paredes*, 30-37.
- Vistoso, E., & Martínez, J. (2020). Potasio disponible y fertilización en suelos de la Región de Los Ríos. *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS*.
- Viveros, A. (2014). Química y ecotoxicología de los herbicidas. *CONTAMINACIÓN E IMPACTO AMBIENTAL: DIAGNÓSTICO Y TENDENCIAS*, 235-247.

VIII. ANEXO

Anexo A. Análisis de las muestras.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	ROLIN AQUINO BRAVO	FECHA DE REPORTE:	14/11/2024
PROCEDENCIA:	CASERIO VILLARICA - DISTRITO SANTO DOMINGO DE ANDA - PROVINCIA LEONCIO PRADO - REGION HUANUCO	FECHA DE RECEPCIÓN:	25/10/2024
REFERENCIA:	MUESTRA DE SUELOS	FECHA DE INICIO DE ENSAYOS:	25/10/2024

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO						ANÁLISIS QUÍMICO										ANÁLISIS QUÍMICO														
			Arena		Arcilla		Limo	CE	pH	Materia Orgánica	N	C	P	K ₂ O	Fe	Zn	Mn	Cu	Cd	Pb	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICE	Basec Cambiabilec	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio		
			Ao	Arc	Lo	Clase Textural	ds/m																									M.O.	total
			CODIGO DEL LABORATORIO	REFERENCIA	%	%	%		1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	S24-1255-1	i T0	44	20	36	Franco	0.32	3.42	1.25	0.063	0.725	3.973	97.820	452.880	1.442	66.400	1.236	0.123	3.348	---	0.940	0.106	0.251	0.012	2.000	0.500	3.810	34.378	65.622	52.497			
2	S24-1255-2	i T11	46	20	34	Franco	0.37	3.76	1.27	0.064	0.737	6.383	135.185	501.800	1.646	70.800	2.472	0.151	3.940	---	1.180	0.148	0.262	0.014	1.500	1.300	4.404	36.428	63.572	34.057			
3	S24-1255-3	i T12	48	16	36	Franco	0.38	3.77	1.28	0.064	0.742	6.561	133.293	522.720	1.658	72.325	2.244	0.145	4.032	---	1.240	0.164	0.273	0.015	1.400	1.500	4.592	36.841	63.159	30.491			
4	S24-1255-4	i T13	46	20	34	Franco	0.38	3.72	1.39	0.070	0.806	5.937	140.669	505.400	1.641	80.952	2.532	0.181	3.844	---	1.200	0.149	0.277	0.014	1.450	1.450	4.540	36.123	63.877	31.938			
5	S24-1255-5	i T21	48	18	34	Franco	0.41	3.85	1.50	0.075	0.870	7.543	198.286	573.640	1.798	265.825	2.876	0.157	4.896	---	1.730	0.296	0.331	0.017	2.500	0.500	5.374	44.176	55.824	46.520			
6	S24-1255-6	i T22	48	18	34	Franco	0.46	3.83	1.58	0.079	0.916	7.453	190.904	589.120	1.711	237.040	3.208	0.134	4.108	---	1.650	0.274	0.309	0.016	2.900	0.600	5.749	39.117	60.883	50.446			
7	S24-1255-7	i T23	46	16	38	Franco	0.45	3.84	1.54	0.077	0.893	7.453	186.958	595.240	1.733	228.640	3.204	0.111	3.796	---	1.670	0.280	0.330	0.016	2.480	0.520	5.297	43.360	56.640	46.823			
8	S24-1255-8	i T31	46	18	36	Franco	0.54	3.93	1.67	0.084	0.969	8.078	267.376	612.574	1.952	285.478	3.928	0.165	4.060	---	2.630	0.438	0.423	0.018	1.800	0.400	5.708	61.456	38.544	31.536			
9	S24-1255-9	i T32	42	20	38	Franco	0.52	3.90	1.66	0.083	0.963	8.167	262.561	623.985	1.956	282.658	3.372	0.167	4.080	---	2.780	0.499	0.415	0.019	1.500	0.400	5.613	66.152	33.848	26.722			
10	S24-1255-10	i T33	44	20	36	Franco	0.59	3.92	1.62	0.081	0.940	8.346	256.632	614.720	2.009	257.963	3.524	0.207	3.816	---	2.810	0.441	0.475	0.019	1.500	0.500	5.745	65.186	34.814	26.110			
11	S24-1255-11	f T0	38	24	38	Franco	0.37	3.84	1.32	0.066	0.766	4.063	99.640	523.160	1.508	72.480	1.680	0.129	3.522	---	1.220	0.203	0.237	0.014	1.800	0.100	3.574	46.843	53.157	50.359			
12	S24-1255-12	f T11	40	22	38	Franco	0.45	3.86	1.36	0.068	0.789	6.918	181.577	609.960	1.907	100.720	2.844	0.121	3.344	---	1.850	0.229	0.354	0.019	2.000	0.200	4.651	52.700	47.300	43.000			
13	S24-1255-13	f T12	40	22	38	Franco	0.43	3.84	1.38	0.069	0.800	6.650	181.619	617.360	1.820	101.560	2.816	0.127	3.516	---	1.890	0.227	0.354	0.020	1.400	0.200	4.091	60.890	39.110	34.221			
14	S24-1255-14	f T13	36	22	42	Franco	0.47	3.87	1.41	0.071	0.818	6.829	181.390	599.240	1.975	108.857	3.024	0.117	2.812	---	1.840	0.223	0.376	0.021	1.300	0.200	3.959	62.116	37.884	32.833			
15	S24-1255-15	f T21	40	20	40	Franco	0.63	3.89	1.65	0.083	0.957	8.257	245.352	767.400	2.225	281.758	3.460	0.137	4.408	---	2.250	0.367	0.354	0.021	0.800	0.200	3.992	74.953	25.047	20.038			
16	S24-1255-16	f T22	36	26	38	Franco	0.66	3.87	1.63	0.082	0.945	8.078	241.869	722.600	2.472	273.160	3.684	0.130	3.712	---	0.214	0.344	0.379	0.022	0.950	0.150	2.059	46.580	53.420	46.135			
17	S24-1255-17	f T23	42	22	36	Franco	0.65	3.85	1.69	0.085	0.980	9.060	247.389	700.845	2.278	280.458	3.364	0.101	3.732	---	0.219	0.342	0.369	0.021	1.200	0.300	2.451	38.796	61.204	48.963			
18	S24-1255-18	f T31	40	26	34	Franco	0.72	3.98	1.75	0.088	1.015	9.149	262.405	702.520	2.589	374.521	3.772	0.139	3.624	---	0.293	0.462	0.598	0.023	0.700	0.500	2.576	53.418	46.582	27.173			
19	S24-1255-19	f T32	38	24	38	Franco	0.71	3.99	1.76	0.088	1.021	8.881	255.288	671.400	2.575	327.120	3.956	0.141	3.785	---	0.299	0.484	0.598	0.024	0.600	0.500	2.505	56.093	43.907	23.949			
20	S24-1255-20	f T33	42	26	32	Franco	0.70	3.95	1.78	0.089	1.032	9.238	258.759	733.160	2.564	382.698	3.708	0.142	3.476	---	0.301	0.485	0.593	0.023	0.650	0.350	2.402	58.371	41.629	27.059			

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este Informe sin la autorización escrita del LASAE.
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

[Firma]
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 42. Resultados del análisis de los parámetros y metales de las muestras del suelo en el Laboratorio de Análisis de suelo, Agua y ecotoxicología.

Tabla 5. Comparación del porcentaje de Arena.

Muestra	ARENA (Ao) %	
	Inicial (i)	Final (f)
To	43.68	37.68
T11	45.68	39.68
T12	47.68	39.68
T13	45.68	35.68
T21	47.68	39.68
T22	47.68	35.68
T23	45.68	41.68
T31	45.68	39.68
T32	41.68	37.68
T33	43.68	41.68

Tabla 6. Resultados de arcilla.

Muestra	ARCILLA (Arc) %	
	Inicial (i)	Final (f)
To	20.48	24.48
T11	20.48	22.48
T12	16.48	22.48
T13	20.48	22.48
T21	18.48	20.48
T22	18.48	26.48
T23	16.48	22.48
T31	18.48	26.48
T32	20.48	24.48
T33	20.48	26.48

Tabla 7. Resultados de limo

Muestra	LIMO (Lo) %	
	Inicial (i)	Final (f)
To	35.84	37.84
T11	33.84	37.84
T12	35.84	37.84
T13	33.84	41.84
T21	33.84	39.84
T22	33.84	37.84
T23	37.84	35.84
T31	35.84	33.84
T32	37.84	37.84
T33	35.84	31.84

Tabla 8. Resultados de conductividad eléctrica.

Muestra	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (dS/m) 1:1	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.321	0.373
T11	0.365	0.448
T12	0.384	0.427
T13	0.375	0.465
T21	0.412	0.627
T22	0.458	0.662
T23	0.448	0.647
T31	0.544	0.721
T32	0.524	0.709
T33	0.588	0.703

Tabla 9. Resultados de PH.

Muestra	PH	
	Inicial (i)	Final (f)
To	3.42	3.84
T11	3.76	3.86
T12	3.77	3.84
T13	3.72	3.87
T21	3.85	3.89
T22	3.83	3.87
T23	3.84	3.85
T31	3.93	3.98
T32	3.9	3.99
T33	3.92	3.95

Tabla 10. Resultados de Materia orgánica

Muestra	MATERIA ORGÁNICA (M.O.) %	
	Inicial (i)	Final (f)
To	1.25	1.32
T11	1.27	1.36
T12	1.28	1.38
T13	1.39	1.41
T21	1.5	1.65
T22	1.58	1.63
T23	1.54	1.69
T31	1.67	1.75
T32	1.66	1.76
T33	1.62	1.78

Tabla 11. Resultados de Nitrógeno.

Muestra	NITROGENO(N)%	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.0625	0.066
T11	0.0635	0.068
T12	0.064	0.069
T13	0.0695	0.0705
T21	0.075	0.0825
T22	0.079	0.0815
T23	0.077	0.0845
T31	0.0835	0.0875
T32	0.083	0.088
T33	0.081	0.089

Tabla 12. Resultados de Carbono.

Muestra	CARBONO (C)%	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.725058005	0.765661253
T11	0.736658933	0.788863109
T12	0.742459397	0.800464037
T13	0.806264501	0.817865429
T21	0.870069606	0.957076566
T22	0.916473318	0.945475638
T23	0.893271462	0.980278422
T31	0.968677494	1.015081206
T32	0.96287703	1.020881671
T33	0.939675174	1.032482599

Tabla 13. Resultados de Fosforo.

Muestra	FOSFORO (P) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	3.973433559	4.062664587
T11	6.382671314	6.918057482
T12	6.56113337	6.650364398
T13	5.936516175	6.828826454
T21	7.542674678	8.256522902
T22	7.45344365	8.078060846
T23	7.45344365	9.059602154
T31	8.078060846	9.148833182
T32	8.167291874	8.881140098
T33	8.34575393	9.23806421

Tabla 14. Resultados de Oxido de potasio.

Muestra	OXIDO DE POTASIO (K ₂ O) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	97.82025641	99.64
T11	135.1852564	181.5766667
T12	133.2932051	181.6188462
T13	140.6685897	181.3898718
T21	198.2857692	245.3520513
T22	190.904359	241.8692308
T23	186.9575641	247.3887179
T31	267.3757692	262.4046154
T32	262.5612821	255.2883333
T33	256.6320513	258.7591026

Tabla 15. Resultados de Hierro.

Muestra	HIERRO (Fe) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	452.88	523.16
T11	501.8	609.96
T12	522.72	617.36
T13	505.4	599.24
T21	573.64	767.4
T22	589.12	722.6
T23	595.24	700.845
T31	612.574	702.52
T32	623.985	671.4
T33	614.72	733.16

Tabla 16. Resultados de Zinc.

Muestra	ZINC (Zn) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	1.4424	1.5078
T11	1.6464	1.9068
T12	1.658	1.82
T13	1.641	1.975
T21	1.798	2.2248
T22	1.7108	2.4724
T23	1.733	2.278
T31	1.952	2.589
T32	1.956	2.575
T33	2.009	5.654

Tabla 17. Resultados de Manganeso.

Muestra	MANGANESO (Mn) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	66.4	72.48
T11	70.8	100.72
T12	72.325	101.56
T13	80.952	108.857
T21	265.825	281.758
T22	237.04	273.16
T23	228.64	280.458
T31	285.478	374.521
T32	282.658	327.12
T33	257.963	382.698

Tabla 18. Resultados de Cobre.

Muestra	COBRE (Cu) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	1.236	1.68
T11	2.472	2.844
T12	2.244	2.816
T13	2.532	3.024
T21	2.876	3.46
T22	3.208	3.684
T23	3.204	3.364
T31	3.928	3.772
T32	3.372	3.956
T33	3.524	3.708

Tabla 19. Resultados de Cadmio.

Muestra	CADMIO (Cd) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.122905263	0.129
T11	0.150645614	0.121
T12	0.145207018	0.127277193
T13	0.180750877	0.117
T21	0.156821053	0.137
T22	0.133908772	0.13
T23	0.11122807	0.101
T31	0.165164912	0.139
T32	0.167249123	0.140814035
T33	0.206575439	0.142049123

Tabla 20. Resultados de plomo.

Muestra	PLOMO (Pb) ppm	
	Inicial (i)	Final (f)
To	3.348	3.522
T11	3.94	3.344
T12	4.032	3.516
T13	3.844	2.812
T21	4.896	4.408
T22	4.108	3.712
T23	3.796	3.732
T31	4.06	3.624
T32	4.08	3.785
T33	3.816	3.476

Tabla 21. Resultados de calcio.

Muestra	CALCIO (Ca) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	3.973433559	4.062664587
T11	6.382671314	6.918057482
T12	6.56113337	6.650364398
T13	5.936516175	6.828826454
T21	7.542674678	8.256522902
T22	7.45344365	8.078060846
T23	7.45344365	9.059602154
T31	8.078060846	9.148833182
T32	8.167291874	8.881140098
T33	8.34575393	9.23806421

Tabla 22. Resultados de Magnesio.

Muestra	MAGNESIO (Mg) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.106166667	0.203166667
T11	0.148	0.229
T12	0.1635	0.227416667
T13	0.149166667	0.222833333
T21	0.295666667	0.367166667
T22	0.273666667	0.34445
T23	0.280133333	0.342183333
T31	0.4375	0.461666667
T32	0.499333333	0.483616667
T33	0.441166667	0.484566667

Tabla 23. Resultados de potasio.

Muestra	POTASIO(K) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.251384615	0.237435897
T11	0.262307692	0.353538462
T12	0.273487179	0.354
T13	0.276923077	0.375897436
T21	0.331076923	0.353948718
T22	0.308717949	0.378564103
T23	0.329948718	0.368769231
T31	0.422820513	0.598
T32	0.415384615	0.598410256
T33	0.474666667	0.593230769

Tabla 24. Resultados de Sodio.

Muestra	SODIO(Na) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.012173913	0.01373913
T11	0.014130435	0.018652174
T12	0.014591304	0.019617391
T13	0.013904348	0.020678261
T21	0.01726087	0.021356522
T22	0.016330435	0.022147826
T23	0.016486957	0.02086087
T31	0.017513043	0.02346087
T32	0.018652174	0.024252174
T33	0.019034783	0.023391304

Tabla 25. Resultados de Aluminio

Muestra	ALUMINIO(Al) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	2	1.8
T11	1.5	2
T12	1.4	1.4
T13	1.45	1.3
T21	2.5	0.8
T22	2.9	0.95
T23	2.48	1.2
T31	1.8	0.7
T32	1.5	0.6
T33	1.5	0.65

Tabla 26. Resultados de Hidrogeno.

Muestra	Hidrogeno(H) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	0.5	0.1
T11	1.3	0.2
T12	1.5	0.2
T13	1.45	0.2
T21	0.5	0.2
T22	0.6	0.15
T23	0.52	0.3
T31	0.4	0.5
T32	0.4	0.5
T33	0.5	0.35

Tabla 27. Resultados de Cl Ce.

Muestra	(Cl Ce) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	3.809725195	3.574341695
T11	4.404438127	4.651190635
T12	4.591578484	4.091034058
T13	4.539994091	3.95940903
T21	5.374004459	3.992471906
T22	5.74871505	2.059161929
T23	5.296569008	2.450813434
T31	5.707833556	2.576127536
T32	5.613370123	2.505279097
T33	5.744868116	2.40218874

Tabla 28. Resultados de Bases Cambiables.

Muestra	BASES CAMBIABLES (%) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	34.378469	46.84335852
T11	36.42775947	52.70028317
T12	36.84089229	60.8900836
T13	36.12326489	62.11555844
T21	44.17570691	74.9528607
T22	39.11682925	46.58020893
T23	43.35955983	38.79583083
T31	61.45647945	53.41845529
T32	66.15224084	56.09271632
T33	65.18632004	58.37129767

Tabla 29. Resultados de Acidez Cambiables.

Muestra	ACIDEZ CAMBIABLES (%) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	65.621531	53.15664148
T11	63.57224053	47.29971683
T12	63.15910771	39.1099164
T13	63.87673511	37.88444156
T21	55.82429309	25.0471393
T22	60.88317075	53.41979107
T23	56.64044017	61.20416917
T31	38.54352055	46.58154471
T32	33.84775916	43.90728368
T33	34.81367996	41.62870233

Tabla 30. Resultados de Saturación de Aluminio

Muestra	SATURACION DE ALUMINIO (%) Cmol(+)/kg	
	Inicial (i)	Final (f)
To	52.4972248	50.35892351
T11	34.05655742	42.99974258
T12	30.49060372	34.22117685
T13	31.93836756	32.83318268
T21	46.52024424	20.03771144
T22	50.44605577	46.1352741
T23	46.82276387	48.96333534
T31	31.53560773	27.17256775
T32	26.72191513	23.94942746
T33	26.11025997	27.05865651

Tabla 31. Prueba de normalidad.

Parametro	Shapiro- Wilk	Anderson- Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
(% Are.)	0.1490	0.2143	0.1781	0.5478
(% Arc.)	0.1721	0.1766	0.0993	0.7194
(% Lim.)	0.1530	0.0478	0.0793	0.8879
(CE)	0.0817	0.0886	0.0707	0.4139
(pH)	0.0005	0.0019	0.0015	< 0.0001
(M.O.)	0.1062	0.1297	0.2395	0.4257
(N)	0.1062	0.1297	0.2395	0.4257
(C)	0.1062	0.1297	0.2395	0.4257
(P)	0.0630	0.1448	0.4204	0.2622
(K ₂ O)	0.0230	0.0256	0.0195	0.4363
(Fe)	0.6731	0.4917	0.3401	0.7857
(Zn)	< 0.0001	< 0.0001	0.0016	< 0.0001
(Mn)	0.0101	0.0043	0.0161	0.4118
(Cu)	0.1163	0.2139	0.4299	0.2314
(Cd)	0.3821	0.4012	0.4197	0.2367
(Pb)	0.5408	0.4025	0.4577	0.4791
(Ca)	0.1282	0.2233	0.2500	0.6495
(Mg)	0.1779	0.2593	0.3266	0.4846
(K)	0.0159	0.0209	0.0392	0.2565
(Na)	0.6242	0.7917	0.7972	0.6177
(Al)	0.3989	0.4403	0.1737	0.6735
(H)	0.0002	< 0.0001	< 0.0001	0.0168
(CICe)	0.0763	0.1385	0.2925	0.5023
(Bases Cambiables)	0.2323	0.2702	0.4852	0.5462
(Acidez Cambiable)	0.2323	0.2702	0.4852	0.5462
(Saturación de Aluminio)	0.0553	0.0327	0.0611	0.4072

Anexo B, panel fotográfico.



Figura 43. Visita al caserío Villa Rica.



Figura 44. Visita a las parcelas de *Teobroma cacao* L.



Figura 45. Extracción de la muestra antes de la aplicación de la herbicida.



Figura 46. Recojo, de la muestra, en la parcela 1.



Figura 47. Recojo de la muestra, en la parcela 2.



Figura 48. Recojo de la muestra en la parcela3.



Figura 49. Las muestras del antes del tratamiento con herbicidas.



Figura 50. Parcela antes de la aplicación de la herbicida.



Figura 51. Aplicación de herbicidas en las parcelas.



Figura 52. Parcela después de la aplicación de la herbicida.



Figura 53. Recojo de las muestras después de la aplicación del herbicida.



Figura 54. Muestras recolectadas después del tratamiento con herbicidas.