



Universidad
Mariana

Evaluación de la fitoextracción de mercurio a escala laboratorio de suelos mineros contaminados en
Barbacoas, Nariño

Diana Marcela Castillo Angulo

Universidad Mariana
Facultad Ingeniería
Programa de Ingeniería
Ambiental San Juan de Pasto
2024

Evaluación de la fitoextracción de mercurio a escala laboratorio de suelos mineros contaminados en
Barbacoas, Nariño

Diana Marcela Castillo Angulo

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero (a) Ambiental

Asesora

Ing. Mg. Jenny Lucia Huertas Delgado

Co asesor

Mg. Daniel Alejandro Molina Cuaichar

Universidad Mariana

Facultad Ingeniería

Programa de Ingeniería

Ambiental San Juan de Pasto

2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme la vida y con ella la oportunidad de realizar esta carrera profesional. A Jesús Nazareno por ayudarme a fortalecer día a día mi formación académica y personal, para ser una persona de bien y de gran apoyo para la sociedad.

A la UNIVERSIDAD MARIANA le quiero expresar mis más sinceros agradecimientos por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y apoyarme en todo momento en la realización de este trabajo de grado.

En especial, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mi asesora Mg Jenny Lucia Huertas y a mi coasesor Mg Daniel Alejandro Molina, Por su invaluable ayuda y orientación durante todo este proceso de investigación, sus consejos, su paciencia y guía han sido fundamental y de gran importancia para la elaboración de este proyecto, así mismo quiero agradecer a los jurados Ing. Pablo Pabón y Ing. Santiago Gomes, por su compromiso y disposición para brindarme sus conocimientos, consejos y asesoramiento en este trabajo de grado. Sus aportes han sido fundamentales y de gran importancia para el éxito de este proyecto.

Agradezco al laboratorio de análisis ambiental de la UNIVERSIDAD MARIANA por permitirme hacer uso de sus instalaciones, materiales y equipos, de igual forma agradezco al laboratorista Mg. Hugo Espinosa que fue un pilar fundamental en el análisis de muestras durante este proceso.

Gracias a todos los mencionados anteriormente, he podido llevar a cabo este proyecto y alcanzar los objetivos establecidos. Agradezco su confianza, dedicación y colaboración. Sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

Dedicatoria

Con todo mi amor, le dedico este logro, a mi madre Gladis Mercedes Angulo Quiñones y a mi hija Nahara Sofia Ortiz Castillo, quienes han sido un pilar fundamental para mi desarrollo profesional y personal. Gracias a su cariño, paciencia y comprensión he logrado este gran paso en mi vida, también por inculcar en mí valores y enseñanzas que han generado todo lo que he logrado construir.

De igual manera le dedico este trabajo a mis hermanos Yeici Alexandra Castillo, Adrián Camilo Castillo y Mercedes Carolina Castillo, por ser esas personas incondicionales las cuales me han enseñado que siempre se puede lograr lo que te propones en la vida, a mí padre Jairo Camilo Castillo por darme la vida, a mi sobrina Hellen Angulo por ser la alegría y motivación de mi vida, Igualmente a mis tíos en especial a Nora América Angulo y Gloria Caridad Castillo, a mi abuela Herlinda Mercedes Quiñones, amigo Arles Andrés Cortes, primos, y de más familiares.

Gracias, a mis profesores de la Universidad Mariana en especial a los del programa de Ingeniería Ambiental, por absolutamente todas sus enseñanzas y orientación que han generado en mí un impacto positivo contribuyendo a mi crecimiento académico y personal.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro y por creer en mí. Este trabajo de grado es también de ustedes y espero que pueda ser de beneficio para un mejor desarrollo de la sociedad ¡Gracias, Dios y gracias a todos!

Diana Marcela Castillo Angulo

Contenido

Introducción 12

1. Resumen del proyecto..... 14

1.1. Descripción del problema 15

1.1.1. Formulación del problema..... 16

1.1.2. Hipótesis..... 16

1.2. Justificación..... 17

1.3. Objetivos..... 18

1.3.1. Objetivo general..... 18

1.3.2. Objetivos específicos 18

1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos 19

1.4.1. Antecedentes 19

1.4.1.1. Internacionales 19

1.4.1.2. Nacionales..... 20

1.4.1.3. Regionales. 20

1.4.2. Marco teórico..... 21

1.4.3. Marco conceptual..... 23

1.4.4. Marco contextual 24

1.5. Metodología..... 25

1.5.1. Paradigma de investigación..... 25

1.5.2. Enfoque de investigación 25

1.5.3. Tipo de investigación 26

1.5.4. Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis 26

1.5.5. Técnica e instrumentos de recolección de información 26

1.5.5.1. Las técnicas de investigación..... 26

| | |
|---|----|
| 1.5.5.1.1. Diseño de experimentos..... | 31 |
| 1.5.5.2. Instrumentos de investigación..... | 32 |
| 2. Resultados y Discusión | 34 |
| 2.1. Realizar el proceso de adaptación de la especie vegetal <i>Dracaena trifasciata</i> a las condiciones específicas del medio contaminado presente en los suelos mineros:..... | 34 |
| 2.2. Caracterización del suelo control, con el fin de obtener información sobre sus propiedades físicas – químicas: | 38 |
| 2.3. Analizar la eficiencia de las especies vegetales <i>D. trifasciata</i> , <i>H. annuus</i> y <i>Z. mays</i> en el proceso de fitoextracción hacia un suelo contaminado. | 45 |
| 3. Conclusiones..... | 61 |
| 4. Recomendaciones..... | 62 |
| Referencias bibliográficas | 63 |
| Anexos | 74 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Desarrollo de las actividades de acuerdo a los objetivos de la investigación..... | 26 |
| Tabla 2. Fechas de muestreos..... | 31 |
| Tabla 3. Número total de análisis que serán obtenidos en la investigación..... | 32 |
| Tabla 4. Métodos usados para cada uno de los parámetros físicoquímicos..... | 32 |
| Tabla 5. Sistema de riego durante 6 semanas con agua..... | 36 |
| Tabla 6. Cantidad de cloruro de Hg aplicada en cada riego..... | 37 |
| Tabla 7. Clasificación textural del suelo medido en campo..... | 39 |
| Tabla 8. Propiedades del suelo antes y después del proceso de minería | 42 |
| Tabla 9. Porcentaje de eficiencia de remoción entre tratamientos | 57 |
| Tabla 10. Porcentaje de eficiencia de remoción entre muestreos..... | 58 |
| Tabla 11. Cambios en la textura del suelo | 59 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de localización | 24 |
| Figura 2. Proceso de fitoextracción | 30 |
| Figura 3. Diseño experimental | 31 |
| Figura 4 Proceso de adaptación..... | 34 |
| Figura 5. Instalación del atmómetro | 35 |
| Figura 6. Finalización del proceso de adaptación | 38 |
| Figura 7. Caracterización del suelo | 39 |
| Figura 8. Cambios generados en el pH del suelo | 45 |
| Figura 9. Cambios generados en el CE del suelo | 46 |
| Figura 10. Cambios generados en la humedad del suelo..... | 47 |
| Figura 11. Cambios generados en la densidad real del suelo..... | 49 |
| Figura 12. Cambios generados en la densidad aparente del suelo | 50 |
| Figura 13. Cambios generados en la porosidad del suelo..... | 51 |
| Figura 14. Cambios generados en la materia orgánica del suelo | 53 |
| Figura 15. Cambios generados en la capacidad de intercambio catiónico del suelo | 54 |
| Figura 16. Cambios generados en la concentración de Hg del suelo | 56 |

Índice de Anexos

| | |
|--|----|
| Anexo A. Presupuesto..... | 74 |
| Anexo B. Cronograma | 75 |
| Anexo C. Quince Días de implementación del proceso de fitoextracción | 77 |
| Anexo D. Dos Meses de implementación del proceso de fitoextracción | 77 |
| Anexo E. Tres Meses de implementación del proceso de fitoextracción | 77 |
| Anexo F. Análisis estadístico del pH..... | 78 |
| Anexo G. Análisis estadístico de la conductividad eléctrica | 78 |
| Anexo H. Análisis estadístico de la porosidad..... | 79 |
| Anexo I. Análisis estadístico de la capacidad de intercambio catiónico | 79 |
| Anexo J. Análisis estadístico de la humedad | 80 |
| Anexo K. Análisis estadístico de la densidad aparente | 80 |
| Anexo L. Análisis estadístico de la materia orgánica..... | 81 |
| Anexo M. Análisis estadístico de la densidad real..... | 81 |
| Anexo N. Análisis estadístico de la concentración de mercurio | 82 |

Glosario

Atmómetro: Instrumento diseñado para medir la cantidad de agua en la atmósfera que se evapora en un periodo de tiempo específico.

Fitoextracción: Extraer contaminantes inorgánicos del suelo mediante la absorción a través de las raíces para su posterior translocación a diferentes partes de la planta donde son acumulados.

Fitorremediación: Es una tecnología, basada en la capacidad que tienen algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes orgánicos como inorgánicos.

Mercurio: Es un elemento químico de la Tabla periódica, con símbolo Hg y número atómico 80, conocido por ser un metal líquido a temperatura ambiente. Es tóxico y bioacumulativo, representando un riesgo ambiental y de salud.

Metales pesados: Son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta y número atómico superior a 20 los cuales representan una alta toxicidad debido a su capacidad de acumularse en tejidos vivos y causar efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.

Minería: Actividad antrópica que se realiza en lugares con presencia significativa de minerales para extraerlos allí y procesarlos para construir casi todo lo que vemos a nuestro alrededor.

Oro: Es un elemento químico de número atómico 79 y símbolo químico “Au”. Se trata de un metal blando de color amarillo y brillante que se encuentra en estado sólido en la naturaleza.

Plantas: Son organismos multicelulares principalmente autótrofos que realizan la fotosíntesis para convertir la energía solar en compuestos orgánicos y desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas.

Suelo: Recurso natural no renovable, considerado como fuente de sustrato para las plantas, de gran importancia para el desarrollo de las actividades humanas y de los ciclos biogeoquímicos.

Introducción

El suelo es un recurso crucial en el entorno natural, formado por una compleja combinación de minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos, tanto macro como microscópicos, que participan en interacciones bióticas y abióticas esenciales (Lugo, 2021). Estas interacciones desempeñan funciones vitales para la sociedad y el equilibrio del planeta, convirtiendo al suelo en un componente indispensable para la vida y el bienestar general (Orjuela, 2010).

La degradación del suelo implica la pérdida real o potencial de su productividad y utilidad, lo que conlleva un deterioro en su capacidad para proporcionar bienes, servicios y cumplir funciones clave en la regulación ambiental (Chen et al., 2019). Este deterioro puede tener consecuencias a largo plazo, afectando la capacidad del suelo para sostener la agricultura, conservar la biodiversidad y mantener la calidad del agua y el aire, subrayando su importancia crítica para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria (Cherlinka, 2021).

Las explotaciones mineras representan una causa significativa de impactos negativos en el suelo debido al desplazamiento masivo de materiales, la creación de vacíos y la liberación de sustancias que alteran las características productivas del terreno, generando problemas ambientales, ecológicos y paisajísticos tanto en la zona de operación como en sus alrededores (Paradelo, 2013).

Colombia, reconocida por su riqueza en los recursos naturales, se ha enfrentado a desafíos significativos vinculados a la contaminación ambiental y la degradación del suelo, especialmente derivados de la actividad minera. Un artículo de El Tiempo (2016) destaca cómo la minería ilegal de oro en el Triángulo del Telembí departamento de Nariño ha desencadenado impactos considerables en el entorno, tales como la deforestación, la contaminación del suelo y la afectación de fuentes de agua. Estos daños ambientales significativos ponen de relieve la complejidad y magnitud del problema generado por esta actividad ilícita.

La explotación ilegal de oro en esta región ubicada en el noroeste de la capital de Nariño ha desencadenado una serie de problemas ambientales graves, que incluyen la pérdida de bosques, la degradación del suelo y la contaminación de fuentes de agua esenciales para las comunidades

locales (Kogut, 2022). Estos impactos no solo perjudican la biodiversidad, sino que también comprometen la salud y el bienestar de las poblaciones cercanas. Además, la concentración de la producción de metales preciosos en municipios como Barbacoas, Magüí Payán, Santa Bárbara, San Andrés de Tumaco y Roberto Payán, evidencian cómo esta problemática no se limita en una zona específica, sino que afecta diversas áreas del país (Agencia Nacional de Minería (ANM), 2017).

Expuesto lo anterior, surge la necesidad de considerar estrategias de remediación como la fitoextracción que es una técnica económica y sostenible de remediación ambiental. En este estudio, se emplearon tres especies vegetales: *Dracaena trifasciata*, *Helianthus annuus* y *Zea mays*. Estas plantas fueron sometidas al contacto directo con suelo contaminado proveniente de la vereda de Güelmambí, en el municipio de Barbacoas, Nariño. Donde se realizó un muestreo completamente al azar. El proceso experimental se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Mariana, sede Alvernia.

1. Resumen del proyecto

La minería es una actividad antrópica que está amenazando y afectando significativamente los suelos por el uso desmedido del mercurio (Hg). A nivel mundial esta actividad está ganando mayor impulso y Colombia no queda al margen de esta tendencia, por lo tanto, este tema ha adquirido gran importancia y complejidad en la actualidad, considerándose como una problemática muy grave debido a su impacto destructivo. Por lo mencionado anteriormente, el presente trabajo busca contribuir a la remediación de suelos contaminados por Hg en el municipio de Barbacoas, Nariño empleado la fitoextracción con las especies vegetales: *Dracaena trifasciata* (Lengua de suegra), *Helianthus annuus* (Girasol) y *Zea mays* (Maíz), como forma efectiva de mitigar esta problemática. Como metodología se evaluaron algunas propiedades fisicoquímicas de los suelos contaminados tales como pH, conductividad eléctrica, humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad, capacidad de intercambio catiónico, textura, contenido de materia orgánica y concentración de mercurio. Se utilizaron cuatro diferentes tratamientos: T0: suelo contaminado solo, T1: suelo contaminado + *Z. mays*, T3: suelo contaminado + *D. trifasciata* y T4: suelo contaminado + *H. annuus*, con el fin de analizar los cambios que ocurren en el suelo con la aplicación de la remediación en un periodo de dos y tres meses. Los resultados de los diferentes tratamientos mostraron cambios beneficiosos en las propiedades fisicoquímicas del suelo, el pH aumentó de 3,93 a 4,8 la materia orgánica aumentó del 2,97% al 6,28% la concentración de Hg disminuyó de 45,07 mg/kg a 18,47 mg/kg la capacidad de intercambio catiónico aumento de 21.62 meq/100g-1 a 38,48 meq/100g-1 y la porosidad aumento de 34,41% a 45,67%. Esto se debió a la efectividad de las plantas en la absorción de mercurio, para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, la planta que mayor eficiencia presentó fue el *Z. mays* seguido por *H. annuus* y la que obtuvo menores resultados fue la *D. trifasciata*. Por lo tanto, se concluye que el uso de las plantas es una estrategia efectiva para mejorar las propiedades fisicoquímicas de suelos afectados por la minería, lo cual es fundamental para restaurar y aumentar la calidad de estos suelos. Esta investigación evidenció que las plantas pueden facilitar los procesos de sucesión ecológica ofreciendo una alternativa viable, para enfrentar la degradación del suelo considerando factores como el tiempo de aplicación de las plantas riego y el nutriente aplicado.

1.1. Descripción del problema

La minería, es una actividad económica dedicada a la extracción de minerales, y se ha convertido en un problema nacional por su impacto negativo al medio ambiente, a causa de la contaminación por el uso inadecuado del Hg, lo cual ha generado un inmenso riesgo sobre la salud de la población, el equilibrio de los ecosistemas y sobre la sostenibilidad a mediano y largo plazo de los procesos productivos, debido a que afecta la fertilidad del suelo, además, este metal se acumula, más no se degrada (Español, 2012).

Según Carmona (2015), la minería ilegal ha crecido un 8% del 2021 al 2022 logrando el control territorial por encima de las fuerzas del estado en zonas estratégicas del país como Nariño, Chocó y Antioquia lo que impide, que las empresas con títulos legales puedan ejercer su función, y entregar regalías e impuestos al gobierno por la explotación de esos recursos naturales.

Esta actividad está generando graves afectaciones en el municipio de Barbacoas, Nariño, tales como la degradación de suelos, destrucción de ecosistemas, contaminación del agua, conflictos sociales y desplazamientos forzados, debido a que esta práctica se ha venido efectuando de generación en generación, y se la considera base fundamental del sustento económico de muchas familias que habitan en el municipio.

Este municipio cuenta con un total de 75 minas de oro ilegales, y es el mayor exportador de oro del departamento, presentando un promedio de 19.958 onzas anuales provenientes de la minería ilegal vendidas al Banco de la República (Cámara de comercio de Tumaco (CCT), 2011).

El informe del Programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA, 2007) establece que anualmente en Colombia, esta actividad usa 806 toneladas de Hg y genera emisiones del orden de 150 toneladas del mismo metal.

El uso del Hg en la minería se ha convertido en una grave problemática ambiental, este metal al entrar en contacto con el oro forma una amalgama, la cual hace que la extracción de oro presente

una mayor eficiencia. Según Caiza (2018), este metal se acumula en mayor medida en los primeros centímetros del suelo, y las concentraciones suelen disminuir según se avanza en profundidad, esto se debe a que la disponibilidad de Hg no solo depende de su especiación química sino también de las propiedades del suelo (Sanizo et al., 2019) particularmente el pH, potencial redox y contenido de coloides del suelo, estos factores influyen en la movilidad y disponibilidad del Hg en el suelo (López et al., 2010).

Frente a este grave problema ambiental, se han descubierto diferentes técnicas y procesos de fitorremediación, dentro de ellas está la fitoextracción, que consiste en extraer el metal del suelo a través del sistema radical de la planta, transferirlo y concentrarlo en la biomasa vegetal como una buena estrategia para la recuperación del suelo contaminado con Hg (Delgadillo et al., 2011).

1.1.1. Formulación del problema

¿Cuál de las plantas, entre *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays*, muestra una eficiencia superior en la extracción de Hg del suelo a través del proceso de fitoextracción y un evidente cambio en las propiedades fisicoquímicas?

1.1.2. Hipótesis

La fitoextracción de Hg utilizando diferentes especies vegetales en suelos contaminados tendrá un efecto significativo en la absorción de Hg y mejoras en las propiedades físico - químicas del suelo, manifestado una reducción en la concentración de Hg y cambios en el pH, materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico.

1.2. Justificación

Una de las actividades más relevantes a nivel económico en el país es la minería, esta actividad aporta 62.237 millones de pesos y genera alrededor de 350 mil empleos directos y casi un millón de empleos indirectos en Colombia Según la Agencia Nacional de Minería ANM (2019), sin embargo, 98.567 hectáreas de suelo están siendo utilizadas para la exploración, explotación y establecimiento de grandes consorcios de minería de oro, los cuales están acabando con el paisaje y causan una fuerte erosión y destrucción del medio ambiente. Además de que en sus procesos de extracción de metales preciosos y malas prácticas generan grandes cantidades de residuos (residuos sólidos, aguas residuales cargados con compuesto orgánicos y metales potencialmente tóxicos) los cuales, se arrojan al medio sin ningún control, causando graves problemas del paisaje, de suelos, de agua y sobre todo repercuten en la salud de los habitantes que se encuentran cerca de éstos grandes focos de contaminación (Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC), 2022).

Por lo anterior, es importante establecer estrategias de tratamientos de los desechos mineros, según un informe de la revista El Tiempo (2016), cerca de 200 mil hectáreas de ríos y zonas selváticas son seriamente deterioradas por esta actividad en Colombia. Y el municipio de Barbacoas, Nariño no queda al margen de esta problemática, por eso se propone la fitorremediación como tecnología económica, viable y de gran importancia para pequeños y grandes mineros, por su capacidad para la extracción de metales y recuperación de suelos, dando además una mejora de los paisajes (Ibarra, (2017).

Esta técnica de remediación ayudará a recuperar los suelos debido a la acción de las especies vegetales *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays*. Estas plantas dentro del departamento de Nariño son conocidas con el nombre de lengua de suegra, girasol y maíz, las cuales son accesibles para la comunidad que habita en él, estas especies vegetales cuentan con la capacidad de sobrevivir bajo condiciones de contaminación para que puedan desintoxicar el suelo y favorecer los procesos de restauración ecológica y que los suelos puedan recuperar algunas de sus funciones y características previas a los procesos de contaminación (Mundo Forestal, 2021).

Frente a esta problemática, la presente investigación se basó en implementar la técnica de remediación de suelos con las especies vegetales antes mencionadas con la finalidad de que estas

realicen el proceso de fitoextracción para la remediación de suelos contaminados con Hg, en donde se evaluó la eficiencia de cada una de las plantas y se observaron las mejoras de las propiedades fisicoquímicas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el cambio en las propiedades fisicoquímicas y la fitoextracción del Hg encontrado en suelos contaminados por minería de oro en el Municipio de Barbacoas, Nariño.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el proceso de adaptación de la especie vegetal *D. trifasciata* a las condiciones específicas del medio contaminado presente en los suelos mineros.
- Caracterización del suelo control, con el fin de obtener información sobre sus propiedades físicas - químicas.
- Analizar la eficiencia de las especies vegetales *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays* en el proceso de fitoextracción hacia un suelo contaminado.

1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1. Antecedentes

1.4.1.1. Internacionales.

Autor (es): Wang, J.; Feng, X.; Anderson, C.; Xing, Y. y Shang, L.

Nombre del artículo: Remediation of mercury contaminated sites – A review.

Esta revisión trata sobre el problema de la contaminación por Hg en el suelo y presenta técnicas actuales para su remediación. Se cubren las fuentes de Hg en el suelo, la toxicidad del Hg para humanos, plantas y microorganismos, y varias técnicas de remediación como la solidificación, vitrificación, desorción térmica, nanotecnología, lavado de suelos, electro-remediación, fitoestabilización, fitoextracción y fitovolatilización. El artículo también destaca la importancia de comprender la especiación de Hg en el suelo y la necesidad de mejores métodos de remediación para abordar esta preocupación ambiental y de salud pública.

Autor (es): Makarova, A.; Nikulina, E.; Tsirolnikova, N.; Pishchaeva, K. & Fedoseev, A.

Nombre del artículo: Effect of monoethanolamine salt-containing dicarboxylic acid and plant growth regulators on the absorption and accumulation of mercury.

Este estudio trata sobre el uso de agentes quelantes y reguladores del crecimiento de las plantas para mejorar la fitoextracción de Hg del suelo. El estudio encontró que la sal de monoetanolamina del ácido ditiodiacético (MEDBA) fue efectiva para aumentar la absorción de Hg en trébol blanco y berro, pero tuvo un efecto inhibitorio cuando se usó en combinación con reguladores del crecimiento. El estudio destaca el potencial de la fitoextracción como una tecnología rentable para reducir los niveles de Hg en el medio ambiente. Además, el estudio también explora la importancia de la fitorremediación como una solución sostenible y rentable para suelos y aguas contaminadas.

Autor (es): Sitarska, M.; Traczewska, T.; Filarowska, W.; Hołtra, A.; Wojdyła, D. & Lorenz, B.

Nombre del artículo: Phytoremediation of mercury from water by monocultures and mixed cultures pleustophytes.

Este estudio trata sobre la capacidad de dos especies de plantas acuáticas, *Lemna minor* y *Salvinia natans*, para eliminar el Hg del agua contaminada. El estudio evaluó la eficacia de la fitorremediación, un proceso que utiliza plantas para eliminar contaminantes del medio ambiente, en la eliminación del mercurio. Los resultados mostraron que ambas plantas fueron efectivas en la eliminación del mercurio, siendo la presencia mixta la más efectiva. El estudio destaca el potencial de la fitorremediación como un método efectivo y de bajo costo para eliminar metales pesados del medio ambiente. La eficiencia de eliminación de Hg fue del 96%, y también se observaron cambios bioquímicos en las plantas debido a los efectos tóxicos del mercurio. El estudio destaca el potencial de la fitorremediación como un método efectivo y de bajo costo para eliminar metales pesados del medio ambiente.

1.4.1.2. Nacionales.

Autor (es): Rocha, L., Olivero, J. & Caballero, K.

Nombre del artículo: Impacto de la minería del oro asociado con la contaminación por Hg en suelo superficial de san martín de loba, sur de bolívar (Colombia).

Esta investigación evalúa los niveles de contaminación por Hg en muestras de suelo superficial de San Martín de Loba, Colombia, que es una zona de minería de oro. El estudio encontró que los niveles de Hg Total (T-Hg) en el suelo eran más altos que el promedio internacional, con una contaminación extrema en el 17% de las muestras y fuerte a extremadamente contaminado en el 70% de las muestras. El estudio sugiere que se deben considerar métodos alternativos de extracción para reducir los niveles de Hg que pueden ser liberados al medio ambiente y afectar la salud humana. La investigación también discute otros estudios sobre la contaminación por Hg en diferentes compartimentos ambientales en diferentes regiones del mundo y cómo la contaminación por Hg representa un riesgo significativo para la salud y el medio ambiente.

1.4.1.3. Regionales.

Autor (es): Baranda Y.; Hernández, P.; Icart, M.; Hernández, Y. & Rubio, O.

Nombre del artículo: Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate.

Este artículo es una revisión de la literatura sobre la toxicidad del cadmio (Cd) en las plantas y las estrategias para reducir sus efectos, centrándose en el caso de los tomates. El Cd es un metal pesado altamente tóxico que puede acumularse en las plantas y tener efectos perjudiciales en su crecimiento y procesos fisiológicos. El artículo analiza los mecanismos de entrada y transporte de Cd en las plantas, así como sus efectos tóxicos y mecanismos de defensa. También explora estrategias para mitigar la toxicidad del Cd, como el manejo de nutrientes, la inoculación bacteriana, el inyección y el uso de reguladores del crecimiento. La planta de tomate es de particular interés debido a su cultivo generalizado y su potencial de acumulación de Cd.

1.4.2. Marco teórico

La minería es la actividad económica en la cual se extraen diferentes tipos de minerales de la corteza terrestre, muchos países consideran que la minería es un motor clave del desarrollo económico (Agencia Nacional de Minería (ANM), 2023).

Existe amplia evidencia de que aquellas naciones que adoptaron leyes mineras modernas y ofrecen un entorno propicio pueden atraer la inversión del sector privado en actividades de exploración y operación minera (Banco Mundial (BM), 2013).

Según, Statista Research Department (SRD), (2022), en 2021, China fue el principal país productor de oro del mundo, con aproximadamente 370 toneladas de este metal precioso. Colombia, tuvo una participación de exportación 2,6 mil millones de dólares e importación 131.000 dólares en oro, convirtiéndolo en el exportador número 30 y el importador número 137 en el mundo (The Observatory of Economic Complexity (OEC), 2021).

El departamento de Nariño, a nivel nacional, aportó con una participación del 9.52% de oro, siendo el municipio de Barbacoas uno de los mayores productores de este metal precioso (Agencia Nacional de Minería (ANM), 2017).

Esta actividad tiene un impacto negativo en el medio ambiente, generando residuos como polvo, gases, desmontes, ruido, metales y aguas residuales, causando graves problemas al suelo, agua y aire.

En el suelo dejan tierras fuertemente excavadas con riesgo de derrumbes, suelos compactados, con pérdida de estructura, con deficiencias químicas, pH extremos y restos de metales pesados tóxicos (Wheeler & Miller, 1990).

Existen diferentes estrategias de remediación de suelos, donde se encuentran las físicas, que son empleadas para suelos contaminados con hidrocarburos (Bioventilación e incineración) químicas, que se realizan con el objetivo de recuperar la calidad del subsuelo (Oxidación química y extracción con disolventes) y biológicas, entre las que se pueden destacar la biorremediación y la fitorremediación, estas técnicas son económicas y viables para pequeñas, medianas y grandes industrias (Domínguez et al., 2016).

La fitorremediación es el uso de plantas para remover, acumular o inmovilizar los contaminantes. Dentro de esta técnica de remediación existen diferentes métodos como: fitoextracción, fitovolatilización, fitoestabilización, fitodegradación y la rizofiltración (Saravanan, 2019).

La fitoextracción se utiliza para eliminar sustancias tóxicas del suelo sin dañar o alterar su estructura mediante la absorción de los contaminantes a través de las raíces de las plantas (Saravanan, 2019).

Las plantas fitorremediadoras se identifican por absorber, degradar o acumular contaminantes del suelo, agua y aire. Dentro de estas encontramos *H. annuus* que, con su raíz pivotante y un sistema radicular expansivo, que puede alcanzar hasta 4 metros de profundidad, destaca por su capacidad para extraer grandes cantidades de nutrientes del suelo (Thangavel & Subhram, 2004). Por otro lado, *D. trifasciata*, originaria de África, posee una estructura robusta y erguida, con hojas duras que presentan bandas amarillas y capacidad para sobrevivir en condiciones adversas con poco cuidado (Rosas, 2018). Al igual, el *Z. mays* que se revela como una especie altamente versátil y adaptable, capaz de crecer en diversos tipos de suelo y climas (Poma & Quiñonez, 2022).

La concentración de Hg se interpreta como la cantidad de Hg presente en una determinada cantidad de suelo, esta medida es crucial para evaluar la contaminación del suelo y los posibles riesgos para la salud y el medio ambiente (Rojas et al., 2008).

1.4.3. Marco conceptual

Los conceptos descritos a continuación dan la definición sobre los términos empleados dentro de la presente investigación para la recuperación del suelo contaminado por Hg.

Suelo: Es el medio natural para el crecimiento de las plantas, que está compuesto de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. Asimismo, el suelo es el producto final del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios) (Ataucusi & Bellido, 2022).

Toxicidad: Grado de efecto tóxico o dañino de una sustancia. Es una medida que permite identificar lo nocivo que puede ser una sustancia al tener contacto con el medio ambiente entre ellos cuerpos vegetales, animales y el ser humano (Espinoza & Manziny, 2019).

Contaminación: Desde el punto de vista ambiental se refiere a todo agente físico, químico o biológico que pueda alterar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas modificando por tanto las condiciones del medio ambiente (Ataucusi & Bellido, 2022).

Metales pesados: Elementos metálicos con elevado peso atómico, como el mercurio, cromo, cobre, cadmio, arsénico y plomo. Estos elementos pueden dañar a los seres vivos a baja concentración y tienden a acumularse a través de la cadena alimentaria (Ataucusi & Bellido, 2022).

Fitorremediación: Tecnología sustentable que utiliza plantas para reducir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelos, sedimentos, agua y aire. Esto se logra a través de procesos bioquímicos llevados a cabo tanto por las plantas como por los microorganismos asociados a su sistema radicular, lo que conduce a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de diversos tipos de contaminantes. (Ataucusi & Bellido, 2022).

Fitoextracción: Tecnología que se basa en la concentración y translocación de contaminantes presentes en el suelo hacia diferentes partes cultivables de la planta a través de sus raíces, lo que resulta en la remediación efectiva del sitio (Ataucusi & Bellido, 2022)

Acumulación: Proceso en el que sustancias químicas se concentran en organismos vivos, alcanzando niveles más elevados que las concentraciones presentes en su medio ambiente o en sus alimentos (Beltrán & Gómez, 2016).

Absorción: Es el proceso por el cual una sustancia puede atravesar los tejidos o células vegetales y depende del material vegetal que se emplee y de su capacidad de desarrollar este mecanismo (Ataucusi & Bellido, 2022).

Remoción: Desde un punto de vista ambiental se define como la eliminación o traslado de una sustancia de un lugar a otro; en especial cuando esta sustancia es contaminante y acarrea consecuencias graves al medioambiente (Beltrán & Gómez, 2016).

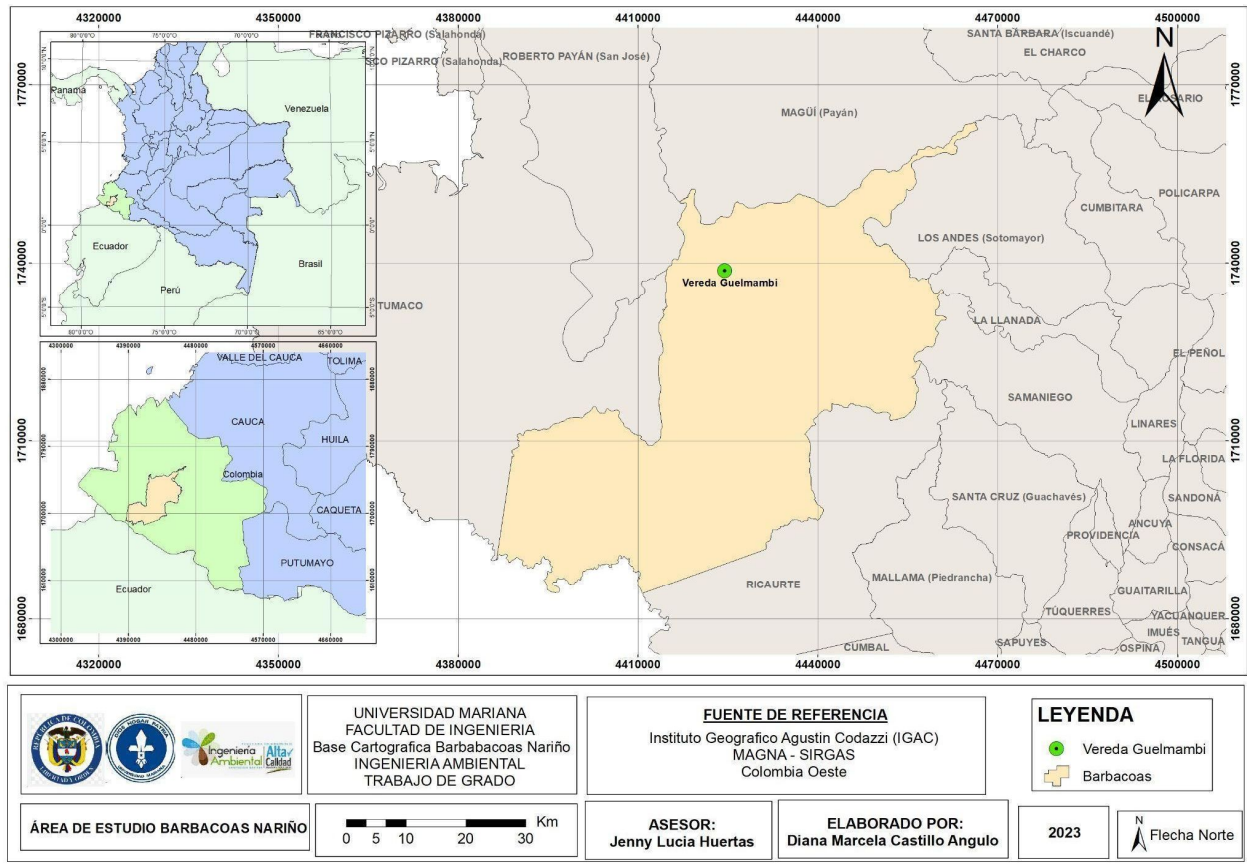
1.4.4. Marco contextual

El municipio de Barbacoas también conocido como la tierra del oro, se encuentra localizado al centro del departamento de Nariño al noroeste de la ciudad de San Juan de Pasto, a una distancia de 235 km por carretera, este hace parte de la región pacífica en zona de pie de monte y litoral. Se encuentra a una altitud de 36 msnm, con temperatura media anual de 26°C, y ubicado geográficamente en las coordenadas 1° 40' 27'' N y 77° 47' 34'' W. Limitando con los municipios de Magüi Payán, Ricaurte, Tumaco y Roberto Payan (Alcaldía Municipal de Barbacoas Nariño, 2018).

Dentro de este municipio se encuentra la vereda Güelmambí, la cual está ubicada a 7 km del casco urbano, la cual solo cuenta con transporte fluvial.

Figura 1

Mapa de localización del municipio de Barbacoas, Nariño



1.5. Metodología

1.5.1. Paradigma de investigación

El campo y línea de investigación es ambiental, enfocada en la contaminación de suelo y uso de la fitorremediación, y el área es control de la contaminación, por lo tanto, se implementó una estrategia de fitorremediación con la finalidad de reducir las concentraciones de Hg presente en un suelo.

1.5.2. Enfoque de investigación

En la presente investigación se utilizó un enfoque mixto, es decir, cuantitativa y cualitativa, puesto que se midieron las propiedades físicas y químicas del suelo, donde se usó la estadística con el fin de analizar y dar una solución a la pregunta de investigación, así mismo confirmar la hipótesis, donde se realizó la recolección de muestras de forma *in situ*.

1.5.3. Tipo de investigación

Esta es una investigación experimental, con un diseño factorial de efectos fijos, que se basó en la eficiencia que tienen las especies vegetales *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays* para realizar el proceso de fitoextracción de Hg e identificar las cantidades de contaminante absorbido.

1.5.4. Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis

La población para este estudio fueron los suelos mineros contaminados con Hg del municipio de Barbacoas, Nariño.

Se recolectó una muestra de 40 kg de suelo contaminado de las zonas mineras de la vereda Güelmambí, Barbacoas, Nariño.

1.5.5. Técnica e instrumentos de recolección de información

1.5.5.1. Las técnicas de investigación.

Tabla 1

Orden del desarrollo de cada una de las actividades de acuerdo a los objetivos de la investigación

| Título | Evaluación de la fitoextracción de Hg a escala laboratorio de suelos mineros contaminados en Barbacoas, Nariño. | |
|---|---|--|
| Objetivo general | Evaluar el cambio en las propiedades fisicoquímicas y la fitoextracción del Hg encontrado en suelos contaminados por minería de oro en el Municipio de Barbacoas, Nariño. | |
| Objetivos específicos | Actividades | Producto |
| Realizar el proceso de adaptación de la especie vegetal <i>D. trifasciata</i> a las | Selección de las especies vegetales. <hr/> Revisión secundaria de cada una de las especies vegetales empleadas. | Resumen de las plantas y del proceso de adaptación de la |

| | | |
|--|--|--|
| <p>condiciones específicas del medio contaminado presente en los suelos mineros.</p> | <p>Adecuar la zona donde se realizó el proceso de adaptación.</p> <hr/> <p>Obtener la especie vegetal <i>D. trifasciata</i>, atmómetro, compostera, suelo abonado, etc.</p> <hr/> <p>Plantar la <i>D. trifasciata</i> e instalación de atmómetro.</p> <hr/> <p>Medición de la evapotranspiración del agua y riego con agua desclorada.</p> <hr/> <p>Medición de la evapotranspiración del agua y riego con agua desclorada y cloruro de Hg II.</p> | <p>especie vegetal <i>D. trifasciata</i> al medio contaminado.</p> |
| <p>Caracterización del suelo control, con el fin de obtener información sobre sus propiedades físicas – químicas.</p> | <p>Visitar la zona de estudio.</p> <hr/> <p>Realizar la calicata 1m *1m *1m.</p> <hr/> <p>Reconocimiento del suelo.</p> <hr/> <p>Toma de muestras.</p> <hr/> <p>Traslado de muestras al laboratorio.</p> <hr/> <p>Medición de los parámetros fisicoquímicos del suelo sin contaminar y control.</p> <hr/> <p>Análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo.</p> | <p>Tabla de la caracterización del suelo se encuentran en la Tabla 7. y los resultados de las propiedades fisicoquímicas del suelo control y contaminado se presentan en la Tabla 8.</p> |
| <p>Analizar la eficiencia de las especies vegetales <i>D. trifasciata</i>, <i>H. annuus</i> y <i>Z. mays</i> en el proceso de fitoextracción hacia un suelo contaminado.</p> | <p>Obtener materiales para iniciar el proceso de fitoextracción.</p> <hr/> <p>Trasplantar las plantas en sus respectivas macetas y monitoreo constante.</p> <hr/> <p>Agrega dosis única de sustancia quelante (EDTA)</p> <hr/> <p>Realizar fertirriego cada dos días con Irricol Inicio</p> | <p>El logro de este objetivo se refleja en el análisis de las variaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Estos cambios generados por las plantas se presentan en gráficos, además se recopilaron</p> |

Toma y traslado de muestras al laboratorio a los 2 y 3 meses.

Medición de los parámetros fisicoquímicos

Análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Análisis estadístico de los resultados obtenidos después de las mediciones realizadas al suelo, luego de la implementación de la fitoextracción mediante el uso del programa Sigma Plot 12.0.

Descripción del experimento

En la Figura 4 se logra observar la zona donde se llevó a cabo el proceso de adaptación, el cual inició con 10 plantas de *Dracaena*. Este proceso se realizó en una compostera con dimensiones de 90.3 cm de largo, 68.7 cm de ancho y 22.6 cm de profundidad, la cual contenía 38 kg de suelo, suelo con el que venían las plantas al momento de ser adquiridas, además contaba con un plástico de fondo para mantener la humedad y evitar que se filtre el agua.

El proceso de adaptación de las plantas de *Dracaena* consistió en ir agregando gradualmente una solución de cloruro de mercurio II al suelo de la compostera hasta alcanzar una concentración de 71 mg Hg/kg suelo, concentración reportada por algunos trabajos de investigación referenciados más adelante, para poder determinar la cantidad de HgCl₂ requerido se realizaron los cálculos presentados a continuación, indicando que se requerían 40 ml de HgCl₂ para alcanzar la concentración deseada.

- Humedad del suelo abonado de la compostera 83%
- Suelo húmedo de la compostera 38kg

$$C_{ss} = \frac{38}{1 + \frac{83}{100}} = \frac{38}{1 + 0.83} = 20.77 \text{kg suelo seco}$$

- Masa molar Hg= 200.59 g/mol
- Masa molar HgCl₂=271,49 g/mol

$$\frac{200.59 \text{ g/mol}}{271,49 \text{ g/mol}} = 0.738 = 73.8\% \text{Hg}$$

- Concentración de Hg a la que se desea llegar 71mg Hg/kg suelo

$$71 \text{ mg Hg/kg suelo} * 20.77 \text{ kg} = 1473.67 \text{ mg Hg}$$

Cantidad de Hg necesaria = 1473.67mg Hg puro

En 100 ml de solución hay 5g de HgCl₂

5g equivalen a 5000mg

$$5000 \text{ mg}/100 \text{ ml} = 50 \text{ mg/ml}$$

$$\frac{1473.67 \text{ mgHg}}{73.8\% \text{Hg}} = 1996.84 \text{ mg}$$

$$\frac{1996.84 \text{ mg}}{50 \text{ mg/ml}} = 39.94 \text{ ml}$$

Cantidad de HgCl₂ para contaminar el suelo es de 39.94ml

Cabe aclarar que el proceso de contaminación del suelo se efectuó a la par de los riegos que se aplicaban día por medio, y para determinar la lámina de riego efectiva a aplicar se usó un Atmómetro (ET_{gage}) que nos permite determinar la ET_o del lugar del estudio y realizar la aplicación con base a la demanda atmosférica.

Muestreo de suelo contaminado

Luego en el municipio de Barbacoas se realizó un respectivo reconocimiento del suelo, el mismo día se tomaron las muestras del suelo sin contaminar y control (suelo contaminado) en la cual se hizo uso de materiales como: Una pala que esté previamente limpia, cuchillo grande, metro, bolsas plásticas y costales. Para realizar este proceso, se identificó un punto donde se estaba realizando la actividad minera y otro punto donde no se ha realizado actividad minera, se tomaron muestras con el método de la pala a una profundidad máxima de 30 cm.

Las muestras obtenidas fueron llevadas al laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Mariana Sede Alvernia para así analizar cada uno de los parámetros fisicoquímicos como: Materia orgánica (MO), pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (DA), densidad real (DR) humedad (H), porosidad (P) y su textura antes de aplicar la remediación.

Una vez finalizado el proceso de adaptación de la especie vegetal *D. Trifasciata*, y obtenido los materiales como (semillas, macetas, quelante, nutriente, gramera y jarra medidora) se pesaron 3k de suelo control por cada maceta y se lo dejó en reposo durante 2 días para que se recupere la capacidad de campo, el día 13 de diciembre 2023 se inició a sembrar cada una de las plantas en sus respectivas macetas incluyendo las semillas de la *H. annuus* y *Z. mays* ya que estas no pasaron por un proceso de adaptación debido a su rápido crecimiento, dando inicio al proceso de fitoextracción.

Figura 2

Proceso de fitoextracción



Después de haber sembrado las plantas en sus respectivas macetas según lo propuesto en el diseño de experimento. Se aplicó una dosis única de 0.75g de sustancia quelante etilendiaminotetraacético (EDTA) a cada 3 kg de suelo.

Expuesto lo anterior se realizó el fertirriego con un tiempo de aplicación de cada dos días, suministrando un total de 150 mililitros de agua por maceta en cada riego. Por lo tanto, para realizar el fertirriego se utilizó 1 g de fertilizante Irricol Inicio disuelto en 2.25 litros de agua, las muestras fueron tomadas del mismo suelo, donde se extrajo 1kg de suelo por cada maceta para realizar la medición de los parámetros fisicoquímicos.

Tabla 2

Fechas de muestreos

| MUESTREOS | FECHA |
|------------|------------|
| Muestreo 1 | 14/02/2024 |
| Muestreo 2 | 14/03/2024 |

1.5.5.1.1. Diseño de experimentos

Dentro de esta investigación, se implementó un diseño experimental utilizando un enfoque de muestreo completamente al azar. Donde se establecieron un total de cuatro tratamientos, cada uno con tres repeticiones, para evaluar un total de 10 parámetros fisicoquímicos. La muestra se obtuvo de un sitio donde se llevaba a cabo el proceso de lavado de la actividad minera.

Como método de remediación, se aplicaron 3 kg de suelo control (suelo contaminado sin planta) por cada maceta, obteniendo un total de 12 macetas y 36 kg de suelo. Las especies vegetales seleccionadas para llevar a cabo el proceso de fitoextracción fueron: *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays*. En cada maceta se sembraron 6 semillas de *H. annuus* y *Z. maiz* y se sembraron 2 plantunas *D. trifasciata* por lo tanto, la toma de muestra se realizó a los 2 y 3 meses de haber se sembrado las plantas.

Figura 3

Diseño de experimentos



Donde:

T0 = Suelo control (Suelo contaminado sin planta)

T1 = Tratamiento 1 (Suelo contaminado + *Z. mays*)

T2 = Tratamiento 2 (Suelo contaminado + *D. trifasciata*)

T3 = Tratamiento 3 (Suelo contaminado + *H. annuus*)

Tabla 3

Número total de análisis que serán obtenidos en la investigación

| Propiedades fisicoquímicas del suelo | Muestreo 1 (Dos meses) | Muestreo 2 (Tres meses) | Total, de muestras |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| %Humedad | | | |
| D. Aparente | | | |
| D. Real | | | |
| pH | | | |
| %Textura | | | |
| CE | | | |
| %Porosidad | | | |
| CIC | 12 | 12 | 24 |
| %MO | | | |
| Hg | | | |
| Con 3 repeticiones de cada parámetro fisicoquímico | | | 72 |
| Número total de resultados en la investigación | | | 720 |

1.5.5.2. Instrumentos de investigación.

Tabla 4

Métodos usados para cada uno de los parámetros fisicoquímicos

| Parámetro | Método utilizado |
|--------------------|---|
| D. Aparente | Método del cilindro graduado |
| D. Real | Método del picnómetro |
| pH | Potenciómetro (electrodo combinado) |
| Humedad | Gravimétrico |
| % Porosidad | Fórmula $100*(1 - (Dr/DAp))$ |
| %Textura | Método del hidrómetro |
| CE | Potenciómetro (electrodo combinado) |
| Mercurio | Espectroscopia de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (Espect ICP-OES) |
| CIC | Método convencional – Acetato de aluminio (HH4OAc) |
| %MO | Pérdida por Calcinación |

Después de realizar las pruebas de laboratorio, se llevó a cabo un análisis utilizando la prueba estadística de Anova de Two-Way con un nivel de confianza del 95%, empleando el programa Sigmaplot 12.0. el cual permite crear gráficos de forma clara y precisa El objetivo fue determinar si existían diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas del suelo entre los distintos tratamientos y muestreos. Los datos obtenidos para cada propiedad fisicoquímica se representan mediante letras minúsculas para cada muestra y letras mayúsculas para cada tratamiento. Se utilizó el p-valor como indicador de la probabilidad de obtener un resultado igual o más extremo que el observado en los datos.

2. Resultados y Discusión

2.1. Realizar el proceso de adaptación de la especie vegetal *Dracaena trifasciata* a las condiciones específicas del medio contaminado presente en los suelos mineros:

El proceso de adaptación se realizó únicamente para *D. trifasciata*, debido a su naturaleza de crecimiento lento (Place Leafy, 2020), por lo que se requiere trabajar con individuos ya establecidos de al menos dos años como en el caso de este estudio, y por lo tanto necesita un período de adaptación antes de ser sometida al medio contaminado. Por otro lado, las semillas de *H. Annuus* y del *Z. Mays*, se sembraron de manera directa, dado que estas dos especies tienen un crecimiento rápido para su desarrollo total, y pueden cumplir un ciclo completo entre 4 a 6 meses, lo que conlleva a realizar la germinación directa en el entorno contaminado para iniciar el proceso de fitoextracción (González, 2016), y si dadas las condiciones iniciales del suelo fueran extremas en concentración de Hg, las semillas no germinarían o no emergerían y se descartarían las especies como potenciales fitoextractoras de Hg.

Figura 4

Inicio del proceso de adaptación de la planta “Dracaena Trifasciata”



La planta *D. Trifasciata* contó con dos años de crecimiento pues, a esta edad habría desarrollado un sistema de raíces más estable y una estructura más completa (Avenue, 2021). En este punto, la planta habrá establecido una base sólida para su crecimiento y adaptación al entorno, tendrá una apariencia más madura, con hojas más largas y robustas, y será más capaz de absorber agua y nutrientes del suelo, lo que puede ser útil en la acumulación de metales pesados en su tejido (Briggs, 2022).

Figura 5

Instalación del atmómetro



El día 19 de septiembre del 2023 se realizó la instalación del Atmómetro (ET_{Gage} ET-8) mediante el cual se midió la evapotranspiración (ET_o) (Figura 5), para determinar la lámina de agua y mantener la humedad del suelo. De acuerdo a la medida de la compostera se aplicó 600 ml de agua por cada milímetro de evapotranspiración medido en el atmómetro, donde cada dos días se realizó el monitoreo del equipo. Para regar las plantas, durante las seis primeras semanas se utilizó 100% de agua del grifo la cual es apta para consumo humano, esta pasó por un proceso de reposo por 24 horas para eliminar el cloro disuelto, puesto que este puede ocasionar alteraciones en la planta durante el proceso, para que el riego sea uniforme se utilizó una botella con agujeros muy pequeños con la finalidad de que esta se distribuya de manera homogénea por toda la compostera.

Tabla 5

Sistema de riego durante 6 semanas con agua.

| Día | Fecha | Milímetros de Evapotranspiración | Cantidad de agua aplicada (ml) |
|------------------|--------------|---|---------------------------------------|
| Jueves | 21-sep-23 | 4 | 2400 |
| Sábado | 23-sep-23 | 5 | 3000 |
| Lunes | 25-sep-23 | 4 | 2400 |
| Miércoles | 27-sep-23 | 4 | 2400 |
| Viernes | 29-sep-23 | 5 | 3000 |
| Lunes | 2-oct-23 | 6 | 3600 |
| Miércoles | 4-oct-23 | 5 | 3000 |
| Viernes | 6-oct-23 | 4 | 2400 |
| Lunes | 9-oct-23 | 4 | 2400 |
| Miércoles | 11-oct-23 | 5 | 3000 |
| Viernes | 13-oct-23 | 4 | 2400 |
| Lunes | 16-oct-23 | 5 | 3000 |
| Miércoles | 18-oct-23 | 4 | 2400 |
| Viernes | 20-oct-23 | 3 | 1800 |
| Lunes | 23-oct-23 | 5 | 3000 |
| Miércoles | 25-oct-23 | 3 | 1800 |
| Viernes | 27-oct-23 | 4 | 2400 |
| Lunes | 30-oct-23 | 3 | 1800 |
| Miércoles | 1-nov-23 | 3 | 1800 |
| Viernes | 3-nov-23 | 2 | 1200 |
| Lunes | 6-nov-23 | 3 | 1800 |

En la Tabla 5, se presenta la cantidad de agua que se agregó a las plantas que fueron sembradas en la compostera y la evapotranspiración medida con el atmómetro en un período de seis semanas. Donde se observa que la cantidad de agua aplicada está relacionada con la evapotranspiración del agua.

Después de haber transcurrido seis semanas de riego con agua natural, se procedió a realizar la aplicación de agua sintética, compuesta por cloruro de Hg II al 5%. Esta aplicación se llevó a cabo de manera gradual, de la siguiente forma: en los primeros 4 riegos, se aplicó 0.5 ml por cada litro de agua; en el quinto riego, se aumentó la cantidad a 1 ml por litro de agua; a partir del noveno riego y en sucesivos, se aplicaron 2 ml hasta alcanzar un total de 40 ml, con la finalidad de obtener una concentración de 71 mg Hg/kg de suelo en la compostera según lo mencionado por Gyamfi et al., (2021), esta es la concentración de Hg que tiene un suelo contaminado por minería de oro. Lo cual se logra observar en la Tabla 6. Hasta llegar a la concentración deseada, dando por terminado el proceso de adaptación de la especie vegetal *D. trifasciata*.

Tabla 6

Cantidad de cloruro de Hg aplicada en cada riego

| Día | Fecha | Milímetros de Evapotranspiración | Cantidad de agua aplicada (ml) | Cantidad HgCl₂ (ml) |
|------------------|--------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Miércoles | 8-nov-23 | 4 | 2400 | 1.2 |
| Viernes | 10-nov-23 | 3 | 1800 | 0.9 |
| Lunes | 13-nov-23 | 4 | 2400 | 1.2 |
| Miércoles | 15-nov-23 | 3 | 1800 | 0.9 |
| Viernes | 17-nov-23 | 3 | 1800 | 1.8 |
| Lunes | 20-nov-23 | 4 | 2400 | 2.4 |
| Miércoles | 22-nov-23 | 4 | 2400 | 2.4 |
| Viernes | 24-nov-23 | 3 | 1800 | 1.8 |
| Lunes | 27-nov-23 | 5 | 3000 | 6 |
| Miércoles | 29-nov-23 | 4 | 2400 | 4.8 |
| Viernes | 1-dic-23 | 4 | 2400 | 4.8 |
| Lunes | 4-dic-23 | 6 | 3600 | 7.2 |
| Miércoles | 6-dic-23 | 4 | 2400 | 4.8 |
| Total | | | | 40 |

El proceso de adaptación de la *D. trifasciata* con HgCl_2 se llevó a cabo exitosamente, en la medida que las plantas respondieron favorablemente a la aplicación gradual del contaminante. En la Figura 6 se logra observar un crecimiento saludable y continuó, con hojas firmes y sin decoloraciones, así como la aparición de nuevas hojas, lo que indica un manejo eficiente de las condiciones adversas como la humedad y la temperatura (Grosso et al., 2019). Además, las raíces mostraron un desarrollo extenso, lo que sugiere una adecuada absorción de agua y nutrientes demostrando la resistencia a enfermedades y plagas, lo que confirma que las plantas desarrollaron mecanismos efectivos dentro de la misma para tolerar la contaminación con Hg (FAO, 2018).

Figura 6

Finalización del proceso de adaptación



2.2. Caracterización del suelo control, con el fin de obtener información sobre sus propiedades físicas – químicas:

El día 24 de septiembre del 2023 se hizo una visita a la zona de estudio (vereda “Güelmambí”), donde se identificó la zona en la que no se ha realizado actividad minera y se realizó una calicata de 1 m de ancho x 1 m de largo x 1 m de profundidad (Cock et al., 2011).

Figura 7

Caracterización del suelo



Tabla 7

Clasificación morfológica del suelo medido en campo

| Parámetro | Horizonte 1 (0-19 cm) | Horizonte 2 (19-40 cm) | Horizonte 3 (40-64 cm) | Horizonte 4 (64-75 cm) | Horizonte 5 (75-100+ cm) |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Estructura | Bloques Subangulares | Bloques Subangulares | Bloques Subangulares | Bloques Subangulares | Bloques Subangulares |
| Tamaño | Fino | Fino | Mediano | Mediano | Mediano |
| Grado | Moderado | Moderado | Débil | Moderado | Moderado |
| Consistencia Húmedo | Friable | Friable | Muy friable | Muy friable | Muy friable |
| Consistencia saturada (PL) | Ligeramente plástico | Ligeramente plástico | Plástico | Muy plástico | Ligeramente plástico |
| Adhesividad | Adherente | Adherente | Adherente | Muy Adherente | Ligeramente Adherente |

| | | | | | |
|----------------------------|---------------|---------------|------------|------------|---------------|
| Clase textural | Franco limoso | Franco limoso | Franco | Franco | Franco limoso |
| Color | 2.5 YR 4/10 | 10 R 4/12 | 2.5 YR 5/8 | 2,5 YR 4/8 | 7.5 YR 5/6 |
| Raíces (tamaño) | Medianas | Finas | Finas | Finas | Medianas |
| Raíces (Abundancia) | Abundantes | Escasas | Abundantes | Escasas | Escasas |

La estructura del suelo en los horizontes H1, H2, H3, H4 y H5 se observó una estructura subangular, caracterizada por bloques relativamente grandes facilitan la circulación de aire y la retención de agua y nutrientes (FAO, 2023).

Además, los H1, H2, H3 y H5, se observó un grado de estructura moderado, lo que significa que los agregados están bien formados, diferenciados de duración moderada; estos son evidentes, aunque no muy distintos en suelos que no han experimentado alteraciones significativas. Por otro lado, el horizonte H4, es diferente a los demás debido a variaciones en los procesos de formación o a condiciones ambientales presentadas a esa profundidad, en la composición del suelo con un grado de estructura débil, es caracterizado por la formación deficiente de agregados que apenas son visibles y carecen de distinción (FAO, 2023).

En cuanto a la consistencia en húmedo en los horizontes H1 y H2, se califica como "Friable", lo que significa que se requiere una ligera presión entre el pulgar y el índice para romper los agregados. Por otro lado, en los horizontes H3, H4 y H5, se clasifica como "Muy friable", indicando que los agregados se rompen fácilmente con una presión muy ligera entre el pulgar y el índice, pero se mantienen unidos cuando se comprimen (Gisbert et al., 2023).

La consistencia en saturado en los horizontes H1, H2 y H5, se consideran "Ligeramente plásticos", lo que indica que estos suelos tienen cierta capacidad de deformación y pueden adquirir una forma, especialmente cuando están húmedos (FAO, 2023). El horizonte H3 se clasifica como "Plástico", lo que significa que las propiedades del suelo cambian significativamente en esta capa reflejando variaciones en su textura este tiene la capacidad de adquirir una consistencia maleable y moldeable

es especialmente cuando contiene una cantidad significativa de partículas de arcilla y el horizonte H4 se define como "Muy plástico", lo que señala que este tipo de suelo muestra una alta capacidad de deformación y maleabilidad cuando está en un estado húmedo (FAO, 2023). Según la teoría de Álvarez & Castellano (1979), la plasticidad se debe a la presencia de partículas muy delgadas con cargas electromagnéticas en su superficie.

Con la adhesividad se refiere a la capacidad del suelo para adherirse a otros objetos, y se evalúa según el contenido de humedad que muestra una mayor adhesión cuando se ejerce presión entre el pulgar e índice (FAO, 2023). En el caso de los horizontes H1, H2 y H3, estos suelos son clasificados como "Adherentes" debido a su fuerte capacidad de retención de partículas, especialmente cuando están húmedos (FAO, 2023). En contraste, el horizonte H4 se considera "Muy Adherente" Debido a que presenta una alta capacidad de retener humedad y tiende a volverse pegajoso cuando está húmedo (FAO, 2023). Por último, el horizonte H5 se califica como "Ligeramente Adherente" porque tiene una capacidad moderada para retener la humedad y no se vuelve excesivamente pegajoso cuando está húmedo (FAO, 2023).

En lo que respecta a la clase textural de los H1, H2 y H5, se trata de un suelo Franco limoso, que se caracteriza por su textura suave y su capacidad para retener agua, esto significa que este tipo de suelo contiene una cantidad adecuada de arcilla, limo y arena (Almarural, 2024). Por otro lado, en el caso de los H3 y H4, se encuentran dentro de la categoría de Franco, y presentan una textura suave con un tacto jabonoso, estos suelos son ligeramente pegajosos y carecen de contenido de arena (Flores, 2023).

Ahora bien, en el análisis del color se encontró que el color del (amarillo - rojizo) identificado en los H1, H3, H4, H5 se debe a la presencia de hierro, no hidratado como también de dióxido de magnesio que se genera bajo condiciones de periodos largos de meteorización con un buen drenaje y aireación (Poma, 2023), el color rojo presente en el horizonte H2, es característico de suelos mediterráneos de zonas cálidas y se debe a la presencia del mineral hematita (Reyes, 2021).

Por último, se dice que las raíces ejercen presiones sobre el suelo de hasta 2 megapascal (MPa) cuando crecen (Grosso et al., 2019). En cuanto, a los resultados obtenidos en el tamaño y abundancia podemos decir que estas amplían los poros existentes y crean otros nuevos, lo cual genera un mayor empaquetamiento de las partículas y microagregados, y modifican la disposición de las partículas

de arcilla, pero también pueden presentar compactación o problemas de oxigenación en el suelo afectando la capacidad de las plantas para obtener agua y nutrientes (Torres et al., 2013).

Resultados medidos en laboratorio

La Tabla 8 presenta los resultados comparativos entre el suelo contaminado y el suelo sin contaminar, antes de someterse al proceso de minería. Esta comparación permite visualizar los cambios que ocurren en las propiedades fisicoquímicas de ambos tipos de suelos a medida que se desarrolla el proceso de extracción de oro.

Tabla 8

Propiedades del suelo antes y después del proceso de minería

| Muestreo Inicial | pH | CE (dS·m ⁻¹) | % H | Dr (g/cm ³) | DAp (g/cm ³) | % P | % MO | CIC (meq·100g ⁻¹) | Textura | | |
|----------------------|------|--------------------------|------|-------------------------|--------------------------|------|------|-------------------------------|----------------|----|----|
| | | | | | | | | | % | % | % |
| | | | | | | | | | A | L | Ar |
| Suelo Contaminado | 5.06 | 0.53 | 1.36 | 2.62 | 1.42 | 45.6 | 2.28 | 29.62 | 78 | 18 | 4 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | Arenoso franco | | |
| Suelo No Contaminado | 5.21 | 0.01 | 3.01 | 2.55 | 0.91 | 64.2 | 7.41 | 46.98 | 29 | 62 | 9 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | Franco limoso | | |
| | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.09 | 0.02 | 1.63 | 0.05 | 0.35 | | | |
| | 0.04 | 0.00 | 0.25 | 0.12 | 0.03 | 1.61 | 0.12 | 0.46 | | | |

En cuanto al pH, el suelo contaminado es de 5.06, clasificado como fuertemente ácido, mientras que el suelo no contaminado presenta un pH ligeramente superior de 5.21, considerado moderadamente ácido indicando una mayor acidez en el suelo afectado por la minería. Según la FAO (2019), la mayoría de los metales pesados tienden a estar más disponibles a pH ácidos porque son menos fuertemente absorbidos (Ataucusi & Bellido, 2022).

Además, se observa que la conductividad eléctrica que es mayor en el suelo contaminado con un valor de $0.53 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ próximo a estar ligeramente salino, los principales cationes que dan origen a la salinidad son: sodio, calcio, magnesio y potasio y los principales aniones son: sulfuros, cloruros, carbonatos y bicarbonatos estos pueden ser introducidos y liberados durante la extracción del metal (FAO, 2019).

La humedad del suelo sin contaminar es notablemente mayor, con una diferencia de 1.65% en comparación con el suelo contaminado. Este resultado sugiere que la actividad contaminante impacta la humedad, ya que la capa superficial del suelo se ve comprometida, disminuyendo su capacidad para retener agua (Morales et al., 2019).

En cuanto a la densidad aparente, el suelo contaminado se clasifica como media, mientras que el suelo sin contaminar se encuentra en la categoría baja. De acuerdo con Cairo (1995), estos valores están dentro de los rangos establecidos, que son: Bajo ($1.0 - 1.2 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), Medio ($1.2 - 1.45 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), Alto ($1.45 - 1.60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y Muy alto ($> 1.60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Ambos suelos presentan un estado físico inestable, para soporte de plantas, sufrir erosión, retención de agua y nutrientes, si bien esta inestabilidad es más acentuada en el suelo contaminado (Cairo, 1995).

Además, la densidad real del suelo sin contaminar es de $2.55 \text{ g}/\text{cm}^{-3}$, lo cual es menor que la del suelo contaminado, que registra $2.65 \text{ g}/\text{cm}^{-3}$. A medida que la densidad real aumenta, la presencia de minerales densos en suelo tiende a incrementarse, lo que puede limitar el crecimiento de las raíces y la capacidad de retención de agua y nutrientes en el suelo (Rubio, 2010). En cuanto a la porosidad, se nota que el suelo no contaminado exhibe una mayor porosidad en comparación con el suelo contaminado. Un aumento en la porosidad favorece una mejor aireación y un desarrollo óptimo de las raíces, dado que la densidad aparente y la porosidad mantienen una relación inversa (Salamanca & Sedeghian, 2005).

Por otro lado, es notable que el suelo no contaminado exhibe un mayor contenido de materia orgánica, alcanzando el 7.41%, en contraste con el suelo contaminado que registra solo un 2.28%. Lo cual resalta la importancia de la materia orgánica, ya que esta, no solo mejora la fertilidad al aumentar la disposición de nutrientes, sino que también influye de manera positiva en la estructura del suelo

mejorando la retención de agua y promoviendo a la actividad biológica del mismo desempeñando un rol clave en la prestación de servicios ecosistémicos, como el almacenamiento de carbono, la regulación del clima y la presencia de la biodiversidad (Julca et al., 2006). En cuanto al suelo contaminado el bajo contenido de materia orgánica compromete los servicios antes mencionados afectando la salud del suelo como los sistemas naturales interrelacionados como el ciclo del agua, de los nutrientes, del carbono y la biodiversidad (Canet, 2018). Sin embargo, es importante destacar que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es más baja en el suelo contaminado debido a la alteración en su estructura y la acidificación, con un valor de 29.62 meq·100g⁻¹, en comparación con el suelo no contaminado, que presenta 46.98 meq·100g⁻¹. Esta diferencia afecta la capacidad del suelo para retener nutrientes (Ataucusi & Bellido, 2022).

En cuanto a la textura del suelo, se observa que el suelo contaminado presenta un contenido de arena considerablemente mayor, alcanzando el 78%, en comparación con el suelo sin contaminar, que registra un 29%. Asimismo, el suelo contaminado exhibe un contenido de limo mucho menor, representando solo el 18%, mientras que el suelo sin contaminar alcanza un 62%, el contenido de arcilla es del 4% en el suelo contaminado y un 9% en el suelo sin contaminar. Esta variación puede atribuirse a la eliminación de la capa superficial del suelo durante la minería, la cual suele ser más rica en arcilla y limo, pero menos abundante en arena (Ataucusi & Bellido, 2022).

Por último, el suelo no contaminado con una materia orgánica del 7.41%, porosidad del 64.24% y una capacidad de intercambio catiónico de 46.98 meq·100g⁻¹, es más eficiente en la prestación de servicios ecosistémicos (FAO, 2018). Este suelo retiene mejor el agua, regula el flujo hídrico y acumula más carbono, lo que ayuda a mitigar el cambio climático, además su textura franco limosa favorece la biodiversidad y la conservación del suelo, proporcionando un hábitat adecuado para diversas especies (Canet, 2018). En cambio el suelo contaminado, presenta una materia orgánica del 2.28%, porosidad del 45.6% y una capacidad de intercambio catiónico de 29.62 meq·100g⁻¹, muestra una menor calidad de estos servicios afectando negativamente la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas ya que presenta una menor capacidad para retener agua y almacenar carbono, además una mayor conductividad eléctrica indica la presencia de sales lo cual limita la actividad de los microorganismos y fauna del suelo esenciales para la salud del ecosistema, ya que la conservación y mejora de la calidad del suelo son cruciales para asegurar el abastecimiento efectivo de los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de los recursos naturales (FAO, 2018). Mencionado lo anterior se

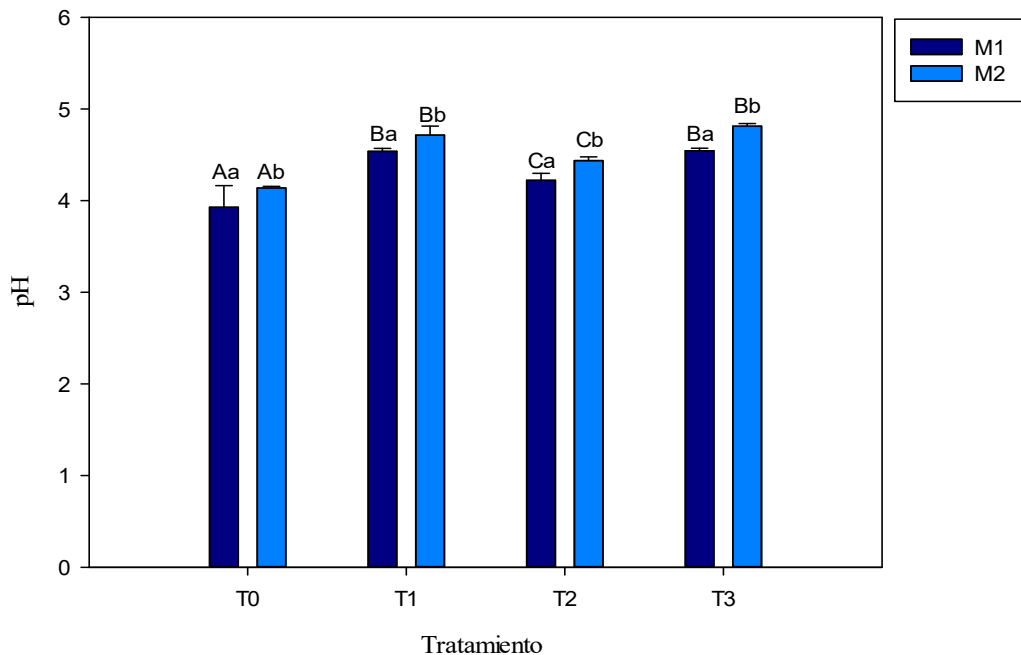
puede decir que la minería daña el suelo comprometiendo su fertilidad, biodiversidad y capacidad para prestar servicios ecosistémicos esenciales para la salud ambiental del mismo.

2.3. Analizar la eficiencia de las especies vegetales *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays* en el proceso de fitoextracción hacia un suelo contaminado.

Una vez realizado el muestreo en las fechas establecidas en la Tabla 2, se procedió a medir los parámetros fisicoquímicos en el laboratorio obteniendo resultados verídicos que nos ayudaron a analizar el desempeño de las plantas en el medio contaminado, presentando los cuatro tratamientos y el error experimental (\pm) obtenido.

Figura 8

Cambios generados en el pH del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

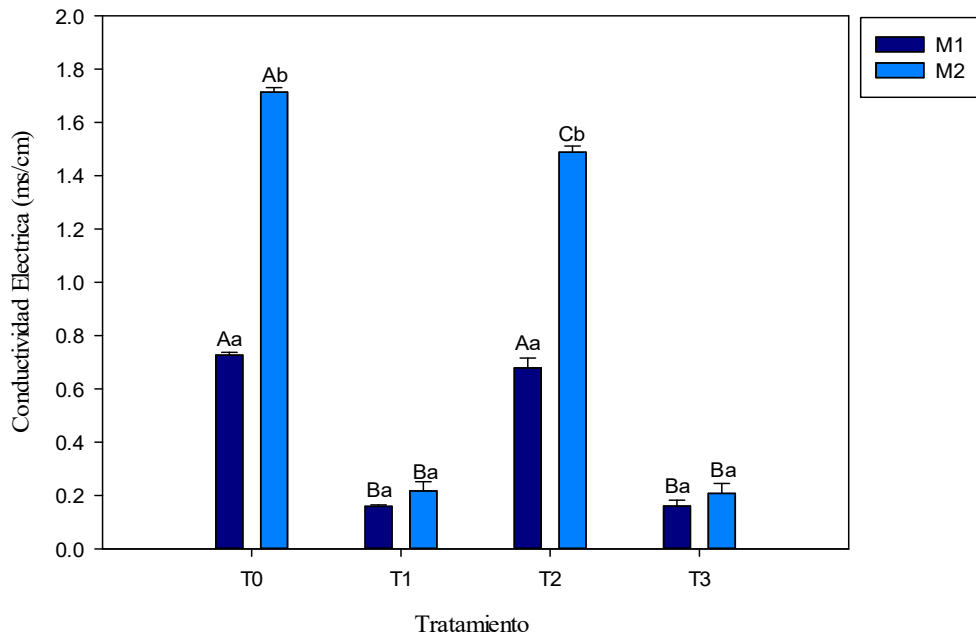
En la Figura 8, se logra observar como las plantas lograron modificar el pH del suelo. El tratamiento T1 es más favorable debido al tiempo, es por esto que en los muestreos M1 y M2 el pH aumentó hasta

un valor de 4.54 y 4.71 haciendo referencia a un tipo de suelo con mejores condiciones (Julca, 2022).

El T0 presentó modificaciones, esto debido a la aplicación de nutrientes y según Grandez & Maximo, (2017) la adición de nutrientes puede causar cambios en el pH durante el proceso de fitoextracción. Sin embargo, T1 y T3 a pesar de tener diferentes plantas, con respecto al T2 lograron generar cambios que son estadísticamente significativos, esto se debe a que las plantas aplicadas presentan dentro de sus propiedades un potencial para el proceso de fitoextracción, siendo más eficientes para mejorar el pH (Villanueva et al., 2023). La Figura 8 muestra que es necesario dejar actuar por más tiempo las plantas para obtener mejores resultados debido a que según Ataucusi & Bellido (2022) a mayor pH la especie dominante es el dihidróxido de mercurio ($Hg(OH)_2$), mientras que a menor pH el cloruro de mercurio ($HgCl_2$) es la especie dominante, de acuerdo con Ibarra, (2017), un suelo en condiciones óptimas para cultivo y actividades asociadas a la zona de estudio, debe oscilar entre un rango 6,5 a 7 para obtener mejor rendimiento y mayor productividad del suelo.

Figura 9.

Cambios generados en la CE del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

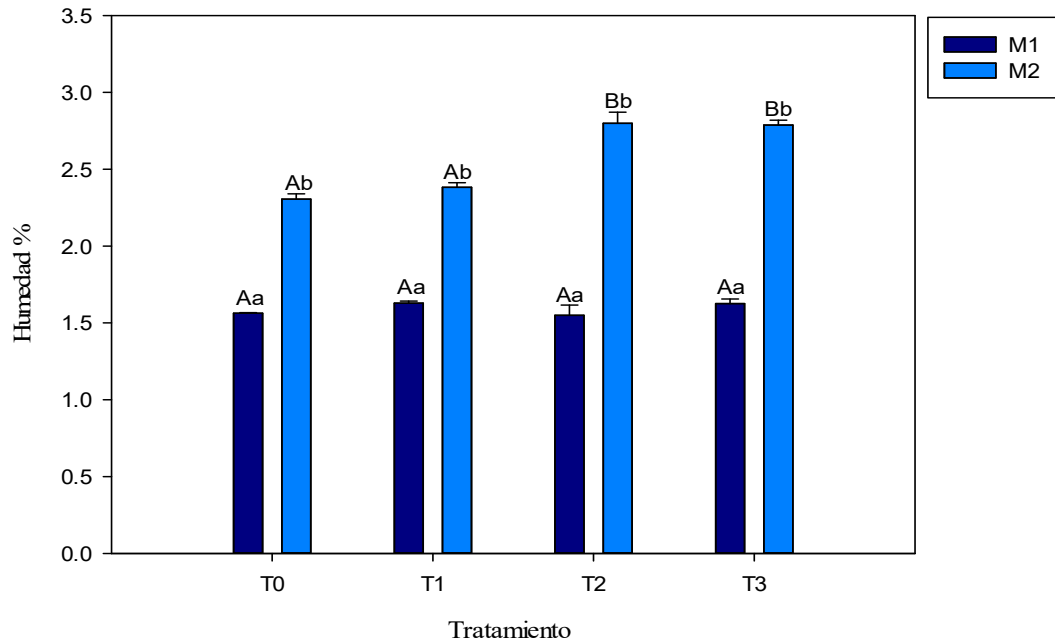
De acuerdo con los resultados obtenidos en la Figura 9, se observa que la conductividad eléctrica aumenta debido a que, en el T0 los dos muestreos, presentan valores superiores de (0.73 y 1.71 ms/cm) respecto al T1, T2, T3, por lo cual se puede afirmar que si la conductividad eléctrica aumenta en un suelo puede indicar que la salinidad del mismo, también se incrementará (Agrinova, 2024).

En el T0 la CE es mayor porque según afirma Mylavarapu et al., (2020) la ausencia de plantas permite que los iones se mantengan en solución, lo que incrementa la CE ya que no hay un sistema radicular que modifique las condiciones del suelo. Según Ataucusi & Bellido (2022) y la clasificación de los suelos en base a su CE, se puede decir que el suelo en la M1 con un valor de 0.73 mS/cm es un suelo de bajo impacto y M2 con un valor de 1.71 ms/cm, moderadamente salino por lo cual el rendimiento en los cultivos puede verse afectado.

Sin embargo, se evidencia que en los T1 y T2 no presentan diferencias significativas entre sí, pero en comparación con el T2 sí hay diferencias significativas, esto se debe a que las plantas con raíces más extensas o con una mayor capacidad para absorber nutrientes tienden a reducir la CE, mientras que plantas adaptadas a condiciones como es el caso de T2 no impactan tanto los niveles de sales disueltas (Shelden & Munns, 2023). Por lo cual se puede afirmar al finalizar este estudio, que los T1 y T2 obtuvieron un suelo con menores contenidos de sales lo cual puede mejorar su rendimiento. Cabe resaltar que valores inferiores a 1.0 mS/cm de CE son muy aptos para cultivos, ya que se obtiene un buen rendimiento (Intagri, 2023).

Figura 10

Cambios generados en la humedad del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

En la Figura 10, se logra observar que en los diferentes tratamientos, la M1 no presenta diferencias significativas en la humedad, que es el contenido de agua que tiene el suelo con valores entre 1.55 y 1.63%, según Abdullah et al., (2021) el contenido de agua en el suelo puede ser homogéneo al inicio del experimento lo que dificulta la identificación de diferencias, debido a que las plantas no han alcanzado su desarrollado (Zhang et al., 2011).

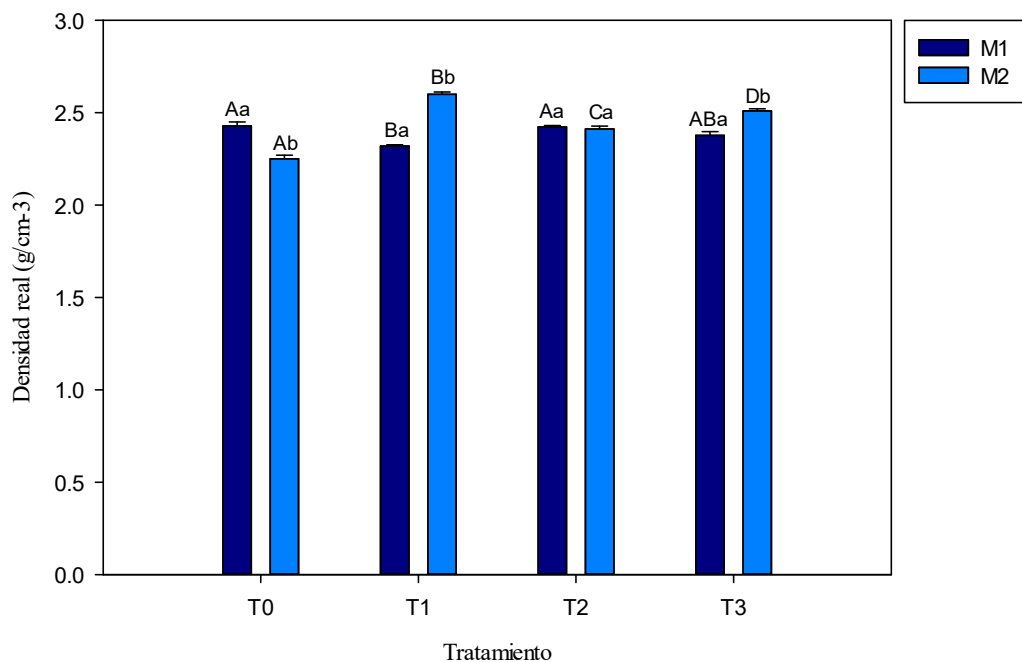
En el T1 y T0 no se presentaron diferencias significativas en ambos muestreos afirma Cárceles et al., (2023) que, durante las primeras etapas de desarrollo, el *Z. mays* aún no tiene un sistema radicular suficientemente profundo para causar diferencias significativas en el contenido de agua del suelo en comparación con un suelo sin ningún tratamiento tal es el caso del T0. Sin embargo la M2 en el T1 con un valor de 2.38% presenta diferencias significativas en comparación con el T2 y T3, esto debido a que el *M. zea* es un gran consumidor de agua especialmente durante su fase de crecimiento, sin embargo el *H. annuus* tiene una menor demanda de agua y la *D.trifasciata* al ser

un cultivo menos comun, tambien se ha reportado como una planta que retiene la humedad (Rex et al., 2019).

La Figura 10, evidencia que es recomendable dejar actuar las plantas por más tiempo, debido a que en la M2 el contenido de agua en el suelo es mayor especialmente para T2, con un valor de 2.80 y 2.79% para T3, según Intagri (2023) una humedad menor al 3% reduce el crecimiento de las plantas, disminuye la absorción de nutrientes y limita el crecimiento y rendimiento del cultivo.

Figura 11

Cambios generados en la densidad real del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

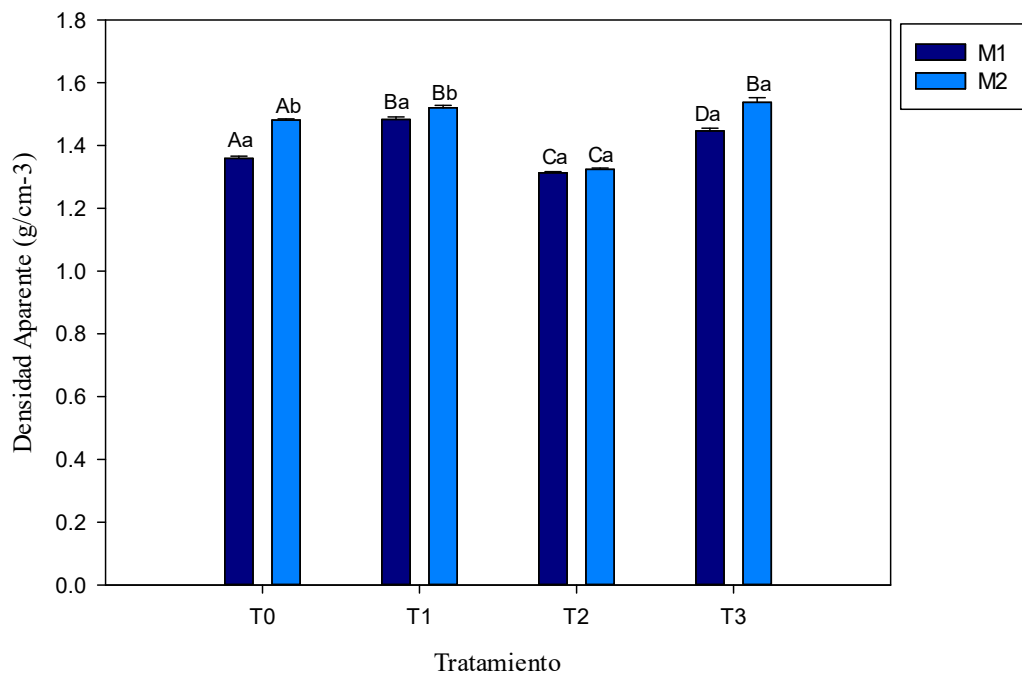
Según los resultados obtenidos en la Figura 11, la M1 de los cuatro tratamientos, obtuvo un valor aproximado de 2.4 g/cm³, lo cual hace referencia a un tipo de suelo que cuenta con una mínima presencia de materia orgánica (Recalde, 2017). Según lo afirma Julca, (2022) al sembrar las plantas se pudo mejorar la condición del suelo en cuanto a su densidad, porque la densidad real tiene un comportamiento inversamente proporcional a la MO. Confirmando así que este suelo puede tener un mayor contenido de materia orgánica.

Sin embargo, en la M2 los T1, T2 y T3 presentan una densidad real entre 2.4 hasta 2.6 g/cm³

mostrando un aumento a pesar de que normalmente se esperaría una disminución, según Ibarra, (2017) la minería altera la textura del suelo, removiendo componentes finos y orgánicos, dejando un sustrato pobre en materia orgánica y con menos porosidad. Menciona Ataucusi & Bellido (2022) a medida que las raíces de las plantas intentan penetrar en el suelo hacen que este se compacte aún más en el sustrato arenoso provocando el aumento de la densidad real. Afirma (Julca, 2022) que con el tiempo, la MO aumenta debido a la incorporación de vegetación lo que mejora la cohesión entre partículas creando poros que permiten un mejor flujo de aire y agua, lo que reduce la densidad real.

Figura 12

Cambios generados en la densidad aparente del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

En cuanto a la Figura 12 de densidad aparente se puede observar que los T0, T2 y T3 en la M1 tiene valores medio como lo afirma Cairo (1995) ya que la denominación de la densidad se encuentra en los siguientes rangos: Dentro de esta clasificación, se encuentran como Bajo ($1.0 - 1.2 \text{ mg/m}^3$), Medio ($1.2 - 1.45 \text{ mg/m}^3$), Alto ($1.45 - 1.60 \text{ mg/m}^3$) y Muy alto ($> 1.60 \text{ mg/m}^3$). Una densidad aparente como la que se obtuvo limitará el crecimiento de raíces, además la densidad es afectada por partículas sólidas y

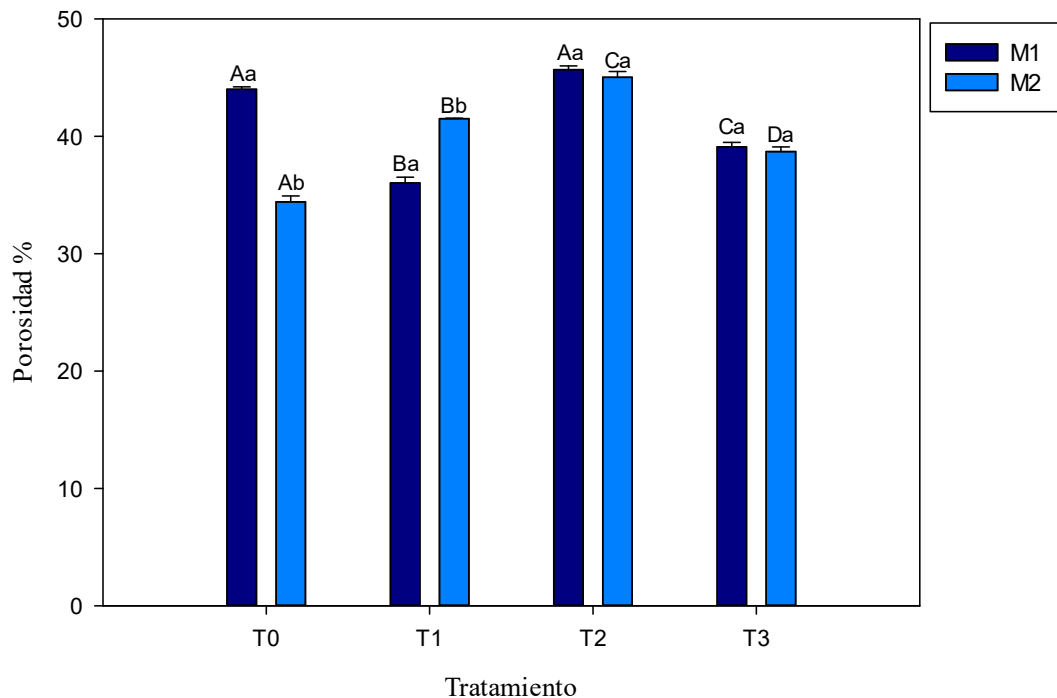
por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la MO (Salamanca & Sabeghian, 2005).

Por otra parte, se observó que la densidad aparente en la M2 los T1 y T2 en comparación con el T0 que presenta un valor de 1.48 mg/m^3 , no presentó diferencias estadísticamente significativas, mientras que en el T1, T2, T3 en el M1 si hubo una diferencia, pero en el T2 de ambos muestreos fue donde el valor de la densidad aparente fue menor manteniéndose estable en ambos muestreos con un valor de 1.32 mg/m^3 el cual es un rango bajo como lo afirma Cairo, (1995).

Por ende, se debe tener en cuenta que en el presente estudio la densidad aparente disminuyó solo en el T2, ya que en los T1 y T3 en ambos muestreos se mantuvo en valores entre 1.4 y 1.5 mg/m^3 . Esto se puede asociar con la materia orgánica, ya que estos dos parámetros presentan una relación inversa, a medida que aumenta la MO, la densidad aparente disminuye y no es lo que se pudo evidenciar en este caso relacionándolo de manera directa con lo ocurrido en la densidad real.

Figura 13

Cambios generados en la porosidad del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

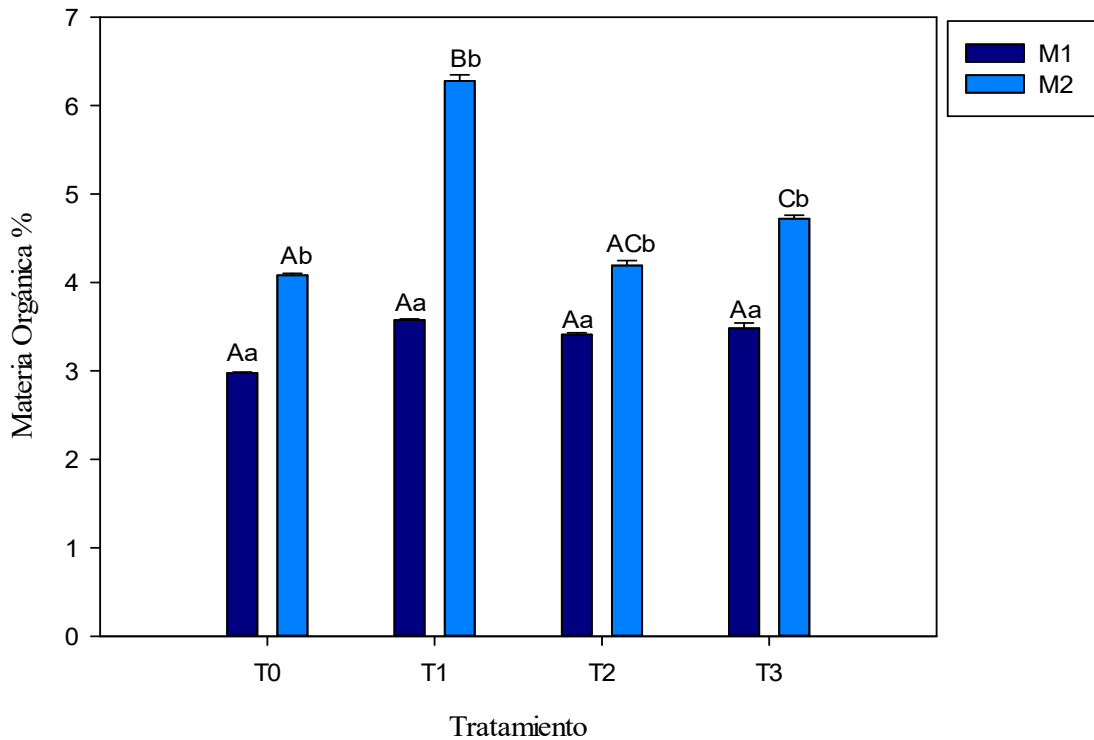
Según la Tabla de clasificación de la porosidad del suelo de Kaurichev, (1984), los rangos de porosidad < 40% hacen referencia a una clasificación muy baja, entre 40 - 50% se clasifican como baja, 50 - 55% clasificación satisfactoria, 55 - 70% clasificación excelente y > 70% clasificación excesiva del porcentaje de porosidad en el suelo.

En la Figura 13, se evidencian cambios estadísticamente significativos en el M2, según un estudio realizado por Grossnickle & Ivetic, (2022) menciona que las plantas mejoran la porosidad del suelo con el tiempo especialmente en periodos largos. El T0, M1 tiene una porosidad del 44%, mientras que M2 presenta una porosidad del 34%, con diferencias significativas entre ambos muestreos, según la clasificación de Kaurichev, (1984) se encuentran en el rango de baja y muy baja indicando una baja capacidad para retener agua, aire y nutrientes, esenciales para el crecimiento de las plantas (Ataucusi & Bellido 2022).

Dentro de los valores encontrados en los T1, T2 y T3 del M2, existe una diferencia estadísticamente significativa con respecto a T0, con rangos de porosidad entre el 39 hasta el 45% presentando mejores resultados el T2 con una porosidad de 45% la cual no presenta diferencia significativa entre muestreo al igual que el T3 que cuenta con una porosidad de 39% según Grossnickle & Ivetic, (2022) esto se debe a que ambas plantas poseen sistemas radiculares que, aunque difieren en la densidad, son capaces de generar una estructura estable en el suelo desde las primeras etapas del proceso de fitoextracción. Se debe tener en cuenta que el T1 si presentó una diferencia significativa en ambos muestreos, esto podría deberse a que el sistema radicular del *Z. mays* es menos denso y profundo, lo que no mejora significativamente la estructura del suelo ni genera un incremento importante en la porosidad por lo cual podría ser necesario dejarlo actuar por más tiempo (Grossnickle & Ivetic, 2022).

Figura 14.

Cambios generados en la materia orgánica del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

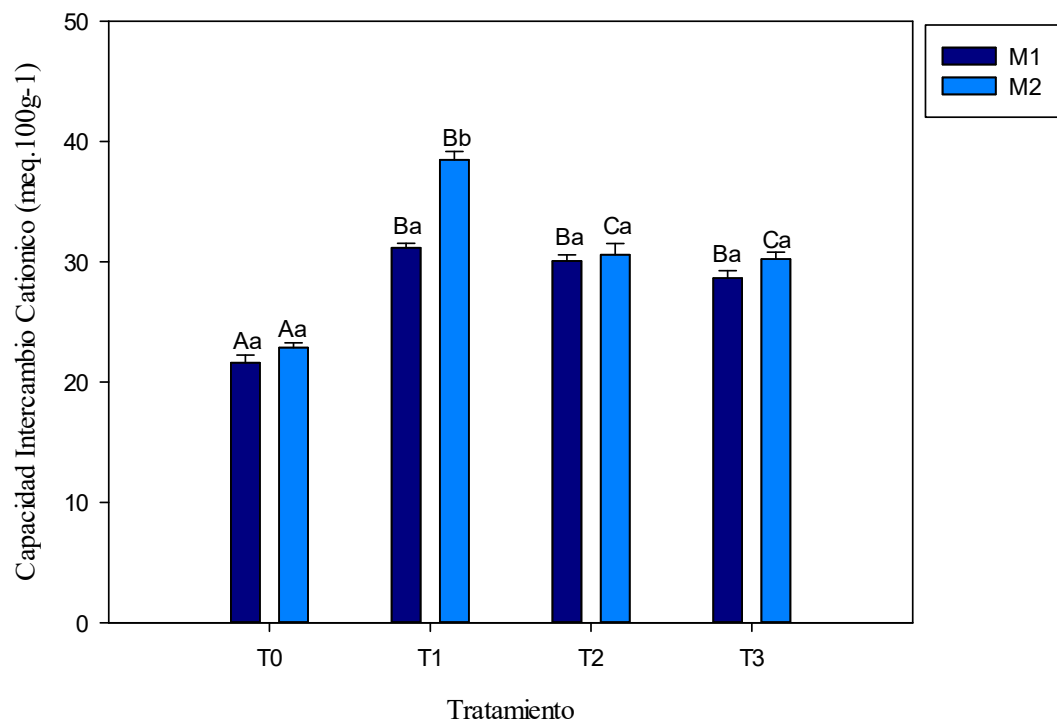
De acuerdo con la Figura 14, todos los tratamientos de la M1 no presentan diferencias significativas la cual se encuentra en un rango de 3 a 4%, según Julca, (2022) afirma que el hecho de que no se observen cambios bruscos puede deberse a que el tiempo de cultivo no fue lo suficientemente extenso para observar un mayor aumento de la materia orgánica. Por otro lado, la M2 presenta una mayor eficacia en la captación y retención de MO, lo que puede contribuir a mejorar la calidad del suelo y su capacidad de soporte para los cultivos pasando de tener valores de MO medios a altos (Ataucusi & Bellido 2022).

Esto se logra observar en los T1 Y T2 los cuales presentan un aumento significativo en la MO del suelo en comparación con el T0, con valores de 5% para el T2 y de 6% para T3. Según la clasificación de Ataucusi & Bellido (2022), estos valores se encuentra en un nivel alto en el contenido de MO, debido a que estas plantas generan más residuos vegetales que al descomponerse contribuyen significativamente al aumento de materia orgánica en comparación con otras especies vegetales, por

su rápido crecimiento, estas plantas tiene una alta producción de biomasa y sistemas radiculares profundos que hacen que estas tengan una gran capacidad de capturar carbono y nutrientes lo que favorecen la actividad microbiana del suelo. De acuerdo con Julca, (2022) contenido de MO es un factor que influencia significativamente la movilidad y biodisponibilidad del Hg en el suelo, y según lo menciona Gaona, (2004) el Hg forma complejos con la materia orgánica, lo que limita la movilidad del mismo haciendo que los compuestos orgánicos actúen como reserva de Hg. Siendo más efectivos los T1 y T3 en relación con Martínez & Marrugo, (2021) dicen que el Hg es altamente retenido por el suelo con MO la cual actúa como adsorbente de metales pesados.

Figura 15

Cambios generados en la capacidad de intercambio catiónico del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

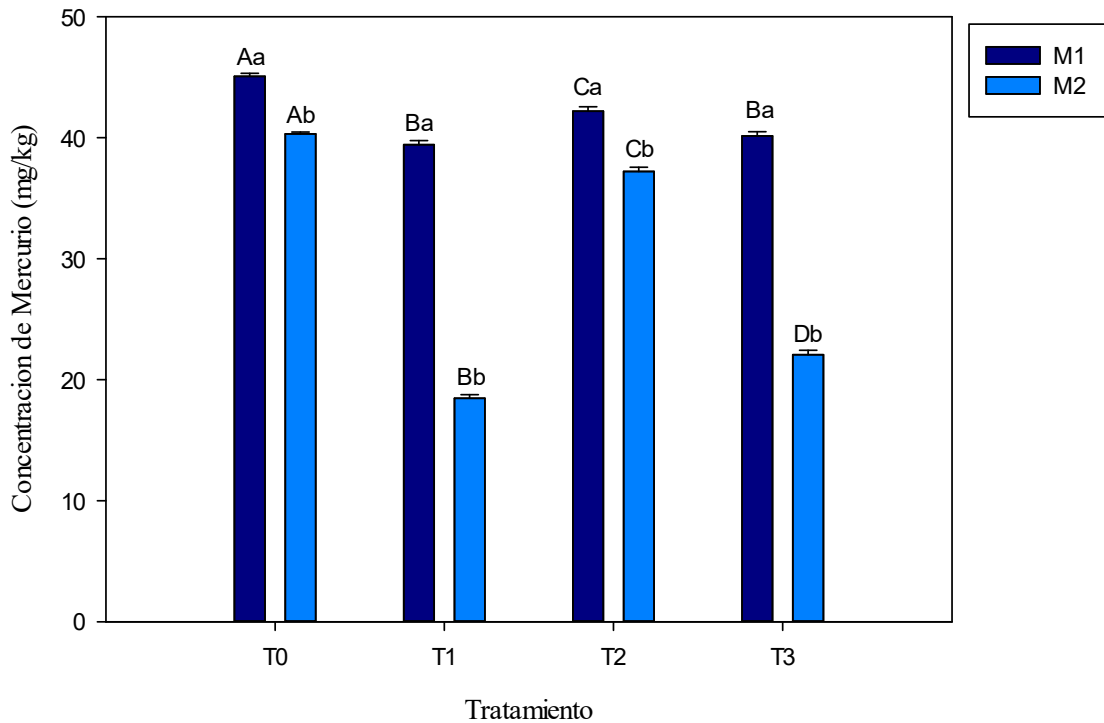
En la Figura 15, se logra observar, el cambio que tiene la capacidad de intercambio catiónico en los T1, T2 y T3 debido a que este aumento, mientras que el T0 se mantiene constante, el aumento de este

parámetro se generó a causa de la estrecha relación que tiene con la materia orgánica del suelo, la actividad biológica y las características de las raíces de las plantas utilizadas. Los incrementos, especialmente en el T2, se debe a lo afirmado por Reyes & Valery, (2007) donde menciona que el *Z. mays* aporta una mayor cantidad de materia orgánica que otras plantas, debido al alto contenido de carbono que estas liberan en el suelo, mejorando la capacidad del suelo para retener nutrientes, lo que se traduce en un mayor incremento de la CIC. Sin embargo, la *D.trifasciata* y el *H. annuus* aunque tienen un efecto positivo, no aportan la misma cantidad de biomasa ni afectan la estructura del suelo (Villanueva et al., 2023).

Por otra parte, los valores más altos obtenidos en este parámetro se encuentran en un rango 30 a 38 meq.100g⁻¹ aproximadamente, por lo cual se puede catalogar la CIC como medio y rico según la clasificación de Moro en 2015: (0-10 meq.100g⁻¹) muy bajo – suelo muy pobre, (10-20 meq.100g⁻¹) bajo – suelo pobre, (20-35 meq.100g⁻¹) medio – suelo medio, (35-45 meq.100g⁻¹) medio- alto – suelo rico y mayor a 45 meq.100g⁻¹ alto – suelo muy rico. También se puede observar que, aunque los valores de CIC aumentaron, el suelo del presente estudio está categorizado en mayor medida como un suelo medio, sin embargo, el T1 de la M2 es el único que está dentro de la categoría de un suelo rico, según Ataucusi & Bellido (2022) los suelos con una alta CIC son más fértiles, lo que promueve a una mejora en la actividad biológica del suelo.

Figura 16

Cambios generados en la concentración de Hg del suelo



Nota: Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestreos dentro de un mismo tratamiento, la línea sobre las barras significa el error estándar.

En la Figura 16, se logra observar una disminución gradual de la concentración de mercurio presente en el suelo mediante el uso de plantas fitorremediadoras, donde el T0 presenta la mayor concentración de Hg lo cual resalta la efectividad de las plantas para extraer y disminuir el Hg. Sin embargo, en los T1, T2 y T3 se presentan diferencias significativas en comparación con el T0, lo cual nos indica que estas plantas cuentan con una capacidad remediadora del suelo según Julca, (2022) menciona que la capacidad de remediación de las plantas varía no solo por la especie utilizada, sino también por las condiciones específicas de la planta, como el crecimiento y desarrollo. Donde el *Z. mays* y el *H. annuus* son conocidos por su rápido crecimiento. Aunque menciona Ibarra, (2017) que las diferencias en la eficacia de la remediación pueden atribuirse a las capacidades individuales de cada planta para absorber mercurio.

Según Julca, (2022) afirma que el *Z. mays* y el *H. annuus* son agentes fitorremediadores eficientes, ya que remueven significativamente los metales pesados del suelo especialmente cadmio y mercurio.

Afirmando lo ocurrido en este estudio, cabe resaltar, que en la M2 el T1 presenta un valor 18 mg/kg y 22 mg/kg para el T3, estos valores están más aptos para cultivos, debido a que según el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, aprobado mediante DS N°011-2017- MINAM, la concentración de Hg para un suelo agrícola es de 6,6 mg/kg

Tabla 9

Porcentaje de eficiencia de remoción del Hg entre tratamientos

| Muestra | Tratamiento | | | | % Porcentaje de Remoción |
|----------------|--------------------|----------|----|----------|---------------------------------|
| M1 | T0 | 45 mg/kg | T1 | 39 mg/kg | 13 |
| | T0 | 45 mg/kg | T2 | 42 mg/kg | 7 |
| | T0 | 45 mg/kg | T3 | 40 mg/kg | 11 |
| M2 | T0 | 45 mg/kg | T1 | 18 mg/kg | 60 |
| | T0 | 45 mg/kg | T2 | 37 mg/kg | 18 |
| | T0 | 45 mg/kg | T3 | 22 mg/kg | 51 |

En la Tabla 9, se logra observar el porcentaje de remoción del Hg en los T1, T2 Y T3 en comparación con el T0 para ambos muestreos, en cuanto al M1 el porcentaje de eficiencia está entre 7 y 13%, según Julca, (2022) esto se debe a que las plantas pueden no haber tenido suficiente tiempo para desarrollar sistemas radiculares profundos o para acumular contaminantes en cantidades significativas.

En el M2, se evidencia un cambio significativo en la eficiencia de remoción. El T1 alcanza una eficiencia del 60% presentando el porcentaje de remoción más alto, de acuerdo con un estudio realizado por Grandez, (2017), quien indica que la especie *Z. mays*, remueve y absorbe metales pesados en la biomasa radicular como en la biomasa del área de la planta, lo cual hace que tenga un gran potencial en el proceso de fitoextracción. Mientras que, el T3 muestra una mejora considerable en la remoción de mercurio, alcanzando una eficiencia del 51%, al igual que Rodrigo, (2018) en su investigación concluye que la especie de *H. annuus* posee capacidad fitorremediadora, debido a que logra bioacumular metales pesados en la masa foliar reduciendo de esta manera la concentración de metal pesado en el suelo. Por otro lado, el T2 mantiene una baja eficiencia en ambos muestreos, con un valor de 7% en M1 a 18% en M2, lo cual nos indica que la *D. trifasciata* tiene una

capacidad limitada para absorber metales pesados debido a su sistema radicular poco profundo y su baja tasa de transpiración lo que reduce la movilidad del contaminante hacia sus tejidos (Vargas et al., 2014).

De acuerdo con Vidal et al., (2010) el cual en su investigación menciona que la variable de mayor influencia en la remoción de Hg del suelo es el tiempo, debido a que las eficiencias en M1 se encuentran entre 7 y 13% para todos los tratamientos, sin embargo, en M2 se observa una gran mejora con porcentaje de remoción de 60% para T1, 18% para T2 y 51% para T3. Los resultados obtenidos de remoción de Hg para el T1 y T3 se pueden comparar con el estudio realizado por Julca, (2022) quien indica que para el Hg los resultados son de 50 hasta 63%.

Tabla 10

Porcentaje de eficiencia de remoción del Hg entre muestreos

| Tratamiento | M1 mg/kg | M2 mg/kg | % Porcentaje de Remoción |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|
| T0 | 45 | 40 | 11 |
| T1 | 39 | 18 | 53 |
| T2 | 42 | 37 | 12 |
| T3 | 40 | 22 | 45 |

En cuanto a la Tabla 10, se logra observar el porcentaje de remoción de los T0, T1, T2 y T3 en ambos muestreos. El T0 presenta un porcentaje de remoción del 11% categorizando como el más bajo en comparación con los demás tratamientos, esto debido a que, no hay plantas que absorban activamente el mercurio. Según Ataucusi & Bellido, (2022) la reducción observada puede deberse a procesos de atenuación natural, como la volatilización o la inmovilización en el suelo, pero sin la acción de las raíces y otros mecanismos de fitorremediación, la capacidad de remoción es muy limitada. El estudio realizado por López & Morales, (2022) ha demostrado que los suelos sin intervención biológica tienden a mostrar bajas tasas de remoción de contaminantes.

El T2 presenta un porcentaje de eficiencia del 12% de acuerdo con la investigación de González,

(2016), las plantas que pasan por un proceso de adaptación pueden desarrollar características específicas que las hacen más eficientes en la fitoextracción de metales pesados que aquellas plantas que se siembran directamente en suelos contaminados. Pero según Clemente et al., (2006) las plantas adaptadas pueden comenzar a absorber contaminantes desde el proceso de adaptación inicial, y en este estudio como no realizó la medición en hojas, raíces y tallo no descartamos la eficiencia de esta planta para el proceso de fitoextracción.

Sin embargo, en los T1 y T3 se logra observar que presentaron una eficiencia de 53% y 45%, Según un estudio realizado por Altamirano & Gamez , (2023) , se encontró que *Z. mays* es más efectivo en la mejora de propiedades físicas y químicas del suelo contaminado con metales pesados, lo que hace más fácil la absorción de Hg en el suelo, Sin embargo, otros estudios como el de Mench et al., (2003) sugieren que *H. annuus* al no producir frutos y tener una menor translocación de metales a partes aéreas de la planta, podría ser preferible para la fitoextracción en términos de costos de vigilancia y gestión para grandes hectáreas.

Textura

Tabla 11.

Cambios generados en la textura del suelo.

| Muestra | Tratamiento | Textura | | |
|---------|-------------|----------------|----|-----|
| | | %A | %L | %Ar |
| M1 | T0 | 79 | 17 | 4 |
| | | Arenoso Franco | | |
| | T1 | 81 | 14 | 5 |
| | | Arenoso Franco | | |
| | T2 | 80 | 16 | 3 |
| | | Arenoso Franco | | |
| | T3 | 81 | 14 | 5 |
| | | Arenoso Franco | | |
| | T0 | 76 | 16 | 8 |
| | | Arenoso Franco | | |

| | | | | |
|----|----|----------------|----|----|
| M2 | T1 | 79 | 13 | 8 |
| | | Arenoso Franco | | |
| | T2 | 78 | 12 | 10 |
| | | Arenoso Franco | | |
| | T3 | 82 | 11 | 8 |
| | | Arenoso Franco | | |

Según la FAO (2013), la textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena (mayor tamaño), el limo y la arcilla (menor tamaño), en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo (Ataucusi & Bellido, 2022).

Los resultados obtenidos en la Tabla 11, muestran que porcentaje de arena presente en el suelo superan el 70%, y según la USDA, (1999) si un suelo presenta porcentajes de arena superiores al 70%, se establece que se trata de un suelo de denominación arenosa (A). Se puede analizar que, en los todos los tratamientos de los dos muestreos, se presenta un alto porcentaje de arena en el suelo.

Por otro lado, los porcentajes de arcilla son bajos, lo que quiere decir que el tipo de suelo varía según este porcentaje (0-10%), y de acuerdo con Gilces, (2014) la textura es una propiedad compleja de modificar, esta propiedad se establece durante la formación del suelo y está influenciada por factores geológicos, climáticos y biológicos a largo plazo, lo que hace que sea difícil de presentar cambios periodos cortos de aplicación de la remediación.

3. Conclusiones

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis de investigación, al demostrar que las especies vegetales empleadas logran extraer Hg del suelo, destacándose el *Z. mays*, especie que presenta una mayor eficiencia en la fitoextracción de Hg, siendo capaz de mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, mediante la remoción efectiva del contaminante.

Asimismo, se pudo confirmar que el suelo del Municipio de Barbacoas Nariño, se encuentra contaminado por Hg, debido a que las concentraciones iniciales tuvieron un valor de 45 mg/kg superando así los Estándares de Calidad Ambiental el cual establece que para el suelo agrícola es de 6.6 mg/kg, residencial/parque 6.6 mg/kg y comercial/industrial 24 mg/kg.

Aunque el *Z. mays* presenta una mayor eficiencia de remoción en el proceso de fitoextracción de Hg, es más preferible utilizar el *H. annuus* para este proceso cuando se vaya a implementar en hectáreas muy grandes de suelo. Esto se debe a que el *Z. mays* produce frutos, y aunque no se ha confirmado que estos frutos contengan concentraciones de Hg, existe la posibilidad de que el contaminante también se almacene dentro del mismo, incrementa los costos de control y vigilancia. Debido a que, es necesario evitar la posibilidad de que las personas obtengan estos frutos.

Además, la presente investigación servirá como una base de datos para futuras investigaciones relacionadas con la fitoextracción usando la *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays*. Ayudando a otros investigadores a tener una guía de cómo desarrollar una investigación y además poder comparar resultados y llegar a conclusiones similares como las que se brindó en esta investigación.

4. Recomendaciones

Para llevar a cabo procesos de fitoextracción de metales pesados, es esencial seleccionar cuidadosamente las plantas a utilizar. No todas las especies vegetales poseen las características necesarias para prosperar en entornos contaminados. La elección adecuada asegura la supervivencia de las plantas en medios altamente contaminados, incrementando así la efectividad del proceso de fitoextracción.

Aunque la investigación ha proporcionado información valiosa sobre la fitoextracción de Hg utilizando *D. trifasciata*, *H. annuus* y *Z. mays*, es necesario realizar estudios in situ. Esto permitirá determinar si la capacidad fitorremediadora de estas plantas se ve influenciada por el clima y otros factores ambientales.

Además, es fundamental establecer un sistema de riego bien estructurado la falta de un sistema de riego adecuado podría dañar las raíces de las plantas debido a la saturación excesiva de agua. Un control cuidadoso del riego asegura la cantidad adecuada de humedad, evitando daños en el sistema radicular, garantizando la adaptación y el rendimiento de las plantas en el proceso de fitoextracción.

Para futuras investigaciones, se podría medir la concentración de Hg en hojas, raíces y tallos, así como realizar más estudios con las especies vegetales empleadas en esta investigación para evaluar su comportamiento con otros metales pesados. Además, es importante implementar un tratamiento adecuado para las plantas que han pasado por el proceso de fitoextracción.

Para iniciar el proceso de fitoextracción, es crucial una planificación detallada del procedimiento y la metodología a emplear. La falta de una planificación clara puede dar lugar a complicaciones que afecten negativamente el avance de la investigación.

Referencias bibliográficas

Abdullah, A., Choudhary, M., & Fawzy, E. (2021). *Los efectos de la agricultura de conservación sobre la capacidad de retención de agua del suelo y el ahorro de agua varían según las prácticas de gestión y las condiciones agroecológicas: una revisión.* <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11091681>

Agencia Nacional de Minería (ANM). (2017). *Caracterización de la actividad minera Departamento de Minería ilegal. amento de Nariño.* https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_narino_01-06-2017.pdf

Agencia Nacional de Minería (ANM). (2019). *Así van las cifras de producción de minería en el segundo trimestre de 2019. Gobierno incentiva inversiones en el sector minero ante desafíos de producción.* <https://www.anm.gov.co/?q=cifras-de-produccion-de-mineria-en-el-segundo-trimestre-de-2019>

Agencia Nacional de Minería (ANM). (2023). *Qué es la minería.* <https://www.anm.gov.co/portalninos/Queeslamineria>

Agrinova. (2024). *¿Cómo entender la conductividad eléctrica de nuestro suelo?* <https://agri-nova.com/noticias/como-entender-la-conductividad-electrica-de-nuestro-suelo/>

Alcaldía Municipal de Barbacoas Nariño. (2018). *geografía.* <https://www.barbacoas-narino.gov.co/municipio/geografia>

Almarural. (2024). *Textura franca: una guía completa sobre este tipo de suelo. Alma Rural.* <https://almarural.com.ar/cultivo/cual-es-la-textura-franca/>

Ataucusi, R., & Bellido, A. (2022). *fitoextracción de hg asistida con humus de lombriz usando artemisia absinthium en un suelo contaminado de huancavelica.* <https://hdl.handle.net/20.500.14005/12523>

Álvarez, E., & Castellano, M. (1979). *Teoría de Plasticidad.*

<https://oa.upm.es/28991/>

- Altamirano, L., & Gamez, R. (2023). *fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) mediante el uso de "zea mays l." una revisión sistemática*. [Altamirano Villanueva, Lizeth Francisca - Gamez Garcia, Rolando Santiago \(Maiz\).pdf](#)
- Banco Mundial (BM). (2013). *Resultados del sector*. <https://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/14/social-development-results-profile>
- Baranda, Y., Hernández, P., Icart, M., Hernández, Y., & Rubio, O. (2019). *Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000300010
- Beltrán, M., & Gómez, A. (2016). *Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y Hg(Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión*. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Briggs, G. (2022). *Crecimiento vegetal: patrones, limitaciones y modelos*. [Crecimiento vegetal: patrones, limitaciones y modelos - LibreTexts Español](#)
- Cárceles, B., Durán, v., Garcias, I., & Soriano, M. (2023). *La agricultura de conservación como sistema sostenible para la salud del suelo para la salud del suelo*. <http://dx.doi.org/10.3390/soilsystems6040087>
- Cairo, P. (1995). *la fertilidad física de suelo y la agricultura orgánica en el trópico*. <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UNANI.010164>
- Caiza, G. (2018). *mercurio en el suelo*. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GISELA%20FERNANDA%20CAIZA%20CAIZA.pdf>
- Camara de comercio de tumaco (CCT). (2011). *Barbacoas*. <https://www.cctumaco.org/wpcontent/uploads/2020/01/BARBACOAS.pdf>
- Canet, R. (2018). *Importancia de la materia orgánica en el suelo*. <https://agroecologia.net/wp-content/uploads/2018/03/importancia-mo-canet-vd.pdf>
- Carmona, P. (2015). *la realidad de la actividad minera en Colombia*. <https://www.usergioarboleda.edu.co/escuela-de-negocios-prime/noticias/editorial-la-realidad-de-la-actividad-minera-en-Colombia-pedro-Carmona-Estanga/>

- Chen, Z., Birhanu, R., Schaldach, R., Seoane, A., Mairaj, T., & Tasawwar, S. (2019). *Revisión Bibliográfica sobre los Recursos Mundiales del Suelo*.
<https://doi.org/10.15480/882.2339>
- Cherlinka, V. (2021). *Conservación del suelo: cómo manejarla e implementarla*.
<https://eos.com/es/blog/conservacion-del-suelo/>
- Clemente, R., Almela, C., & Bernal, P. (2006). *A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste*.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.011>
- Cock, J., Álvarez, D., & Estrada, M. (2011). *Rasta*.
https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/69682/RASTA_2011.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). *fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Domínguez, M., Gómez, S., & Ardila, A. (2016). *Fitorremediación de Hg presente en aguas residuales provenientes de la industria minera*.
<https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/705>.
- Español, S. (2012). *Contaminación con Hg por la actividad minera*.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-41572012000300001
- Espinoza, K. (2019). *recuperación de suelos contaminados con plomo (ii) a escala piloto, utilizando girasol (helianthus annuus l.) con diversos tipos de abono en el distrito de sicaya*.
https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/5443/Tesis_Suelos_Plomo_Girasol.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- FAO. (2013). *Manejo del suelo en producción de hortalizas*.
<https://www.fao.org/4/i3361s/i3361s.pdf>
- FAO. (2018). *guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*.

openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/158f38e2-86ef-47a9-aa3e-21be6fe6bd28/content

- FAO. (2019). *La Contaminación Del Suelo: Una Realidad Oculta*.
https://books.google.com.co/books?id=EjumDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- FAO. (2023). *consistencia del suelo*.
https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm
- FAO. (2023). *estructura del suelo*.
https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm
- Flores, G. (2023). *Que es franco limoso*.
<https://la-respuesta.com/consejos-utiles/Que-es-franco-limoso/>
- Gaona, M. (2004). *El Hg como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*.
<https://www.tdx.cat/handle/10803/3174;jsessionid=C7677337823BEDC50210AD2C>
- Gilces, A. M (2014). *Efectos de la aplicación del biochar y cenizas en las propiedades del suelo*.
Universidad de Valladolid.
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/6632/TFML190.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gisbert, J., Ibáñez, S., & Moreno, H. (2023). *la consistencia del suelo*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7774/consistencia.pdf>
- González, M. (2016). *Mejoramiento de la fitoextracción en plantas nativas en suelos contaminados por actividades mineras en Puchuncaví y Quintero*.
<https://core.ac.uk/download/pdf/95222909.pdf>
- Grandez, A. (2017). *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del Río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (Helianthus Annus) y maíz (Zea Mays) usando*

enmiendas.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/3537>

Grandez, A., & Maximo, G. (2017). *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del Río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (Helianthus Annus) y maíz (Zea Mays) usando enmiendas.*
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/3537>

Grossnickle, S., & Ivetic, V. (2022). *Desarrollo del sistema radicular y establecimiento en campo: efecto de la calidad de las plántulas.*
<http://dx.doi.org/10.1007/s11056-022-09916-y>

Grosso, J., Ressia, J., Bongiorno, C., & Mendivil, G. (2019). *Caracterización del estado de compactación de un suelo bajo siembra directa utilizando herramientas de geoestadística.*
<https://doi.org/10.35305/agro34.221>

Gyamfi, O., Borgen, P., Darko, G., Ansah, E., Vorkamp, K., & Leth, J. (2021). *Contaminación, exposición y evaluación de riesgos del Hgen los suelos de una comunidad minera de oro artesanal en Ghana.*
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128910>

Ibarra, A. (2017). *fitoextracción de metales en suelos contaminados por la minería.*
http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/6929/Fitoextracción_de_metales_Ibarra_Garcia_A_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Intagri. (2023). *Efectos del Exceso de Humedad del Suelo en el Sistema Radical y Absorción de Nitrógeno en el Maíz.*
<https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/exceso-humedad-del-suelo-en-sistema-radical>

Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). *La materia orgánica, Importancias y experiencias de uso en la agricultura.*
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf>

Julca, J. (2022). *capacidad fitorremediadora del maíz y el girasol en suelos contaminados del botadero municipal de Lucma.* <https://hdl.handle.net/11537/31486>

Kaurichev. (1984). *Clasificación de la porosidad del suelo.*

<https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2268>

Kogut, P. (2022). *Degradación del suelo: técnicas para evitar sus efectos*.
<https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/>

López, T.; Sierra, M.; Rodríguez, J & Millán, R. (2010). *Estudio de la Absorción y Distribución del Hgen Nerium Oleander L. en la Ribera del Río Valdeazogues (Estación de Chillón - Almadén)*. http://documenta.ciemat.es/bitstream/123456789/124/1/42726_IC1214.pdf

López, M., & Morales, O. (2022). *Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión*.
[10.5377/elhigo.v12i2.15197](https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197)

Lugo, G. (2021). *El suelo: recurso natural valioso, escaso y amenazado*.
<https://www.gaceta.unam.mx/intensidad-y-volumen-de-lluvias-perjudican-suelos-cultivables/>

Makarova, A., Nikulina, E., Tsirolnikova, N., Pishchaeva, K., & Fedoseev, A. (2022). *Effect of monoethanolamine salt-containing dicarboxylic acid and plant growth regulators on the absorption and accumulation of mercur,*
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9280225/>

Martinez , M., & Marrugo, N. (2021). *Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia*.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:2272

Mench, M., Bussière, J., Castaing, E., Vangronsveld, J., Ruttens, A., De Koe, T., . . . Manceau, A. (2003). *Progress in remediation and revegetation of the barren Jales roja mine spoil after in situ treatments*.
<https://doi.org/10.1023/A:1022566431272>

Ministerio de Medio Ambiente (MINAM). (2017). *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*.
https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf

Morales , C., Lobato, C., Flores , J., & Mendez, C. (2019). *Cambios en las propiedades físicas y*

químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos.

<https://doi.org/10.15174/au.2019.2154>

Moro, A. (2015). *AQM Laboratorios Relaciones catiónicas y su interpretación en los análisis de suelos.*

<https://aqmlaboratorios.com/relaciones-cationicas-analisis-de-suelos/>

Mundo Forestal. (2021). *Lengua de Suegra.*

<https://www.elmundoforestal.com/portfolio/lenguadesuegra/#:~:text=La%20lengua%20de%20suegra%20es,de%20espada%20y%20muy%20erectas.>

Mylavarapu, R., Bergeron, J., Wilkinson, N., & Hanlon, E. (2020). *pH del suelo y conductividad eléctrica: Manual de laboratorio de suelos de la extensión del condado.*

<https://doi.org/10.32473/edis-ss118-2020>

Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC). (2022). *Colombia explotación de oro de aluvión.*

https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe_Colombia_Explotacion_de_Oro_de_Aluvion_Evidencias_a_Partir_de_Percepcion_Remota_2021_SP_.pdf

Organizacion de la Naciones Unidas para la Alimentacion Y la Agricultura (FAO). (2023). *Propiedades Físicas del Suelo.*

<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

Orjuela, H. (2010). *el suelo al servicio de la sociedad y su rol en el contexto de los cambios globales.*

<file:///D:/Nueva%20carpeta/DialnetElSueloAlServicioDeLaSociedadYSuRolEnElContextoDeL-3640660.pdf>

Paradelo, R. (2013). *Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina.*

https://www.igme.es/boletin/2013/124_3/5_ARTICULO%204.pdf

Place Leafy. (2020). *Dracaena trifasciata: cuidados y guía de cultivo.*

<https://leafyplace.com/dracaena-trifasciata/>

- Poma, C. (2023). *Color del suelo*.
<https://es.slideshare.net/yanethmirianbozabendezu/7-color-del-suelo>
- Poma, A., & Quiñonez, C. (2022). *Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con Zea mays l. en un suelo contaminado con cadmio* Leonor Ordoñez, Jauja - 2021
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/11108>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2007). *Contaminación con Hg por la actividad minera*.
<http://www.scielo.org.co/pdf/bio/v32n3/v32n3a01.pdf>
- Recalde, A. (2017). *Caracterización de las propiedades fisicoquímicas: densidad aparente, densidad real, porosidad, textura, color, ph, conductividad eléctrica y materia orgánica de los suelos de la reserva biológica limoncocha*. Universidad Internacional Sek.
<https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2268>
- Revista el tiempo. (2016). *Minería ilegal*.
<https://www.eltiempo.com/multimedia/especiales/mineria-ilegal-en-colombia-problematica-ambiental-y-economica/16460194/1/index.html>
- Reyes, C. (2021). *¿Qué nos dice el color del suelo? The Conversation*. Reyes, C. (2021). *¿Qué nos dice el color del suelo? The Conversation*.
<http://theconversation.com/que-nos-dice-el-color-del-suelo-158575>
- Rex, E., Sudhagar, R., Thiruppathi, M., & Saravanaperumal, M. (2019). *Humedad del suelo, crecimiento de cultivos y rendimiento de maíz influenciados por el sistema agroforestal de albizia saman*.
https://www.researchgate.net/publication/331465051_SOIL_MOISTURE_CROP_GROWTH_AND_YIELD_OF_MAIZE_AS_INFLUENCED_BY_Albizia_saman_AGROFORESTRY_SYSTEM
- Reyes, I., & Valery, A. (2007). *Efecto de la fertilidad del suelo sobre la microbiota y la promoción del crecimiento Del maíz (zea mays l.) Con azotobacter spp*.
https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612007000300001
- Rocha, L., Olivero, J., & Caballero, K. (2018). *Impacto de la minería del oro asociado con la contaminación por Hgen suelo superficial de San Martín de Loba, Sur de Bolívar*

(Colombia).

<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v34n1/0188-4999-rica-34-01-93.pdf>

Rodrigo , T. (2018). *Estimación de la capacidad fitorremediadora del “girasol” Helianthus annuus mediante la incorporación de enmiendas para suelos contaminados por metales pesados (Plomo, Cromo) de industrias metal-mecánicas.*
<https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1069>

Rojas, L., Prin, J., Noriega, J., Albonoz, L., Prada, B., & RamÍres, A. (2008). *determinación de mercurio en suelos del sector minero las claritas, estado bolívar, mediante procesos analíticos de especiación y microscopía electrónica de barrido (MEB).*
<https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739435011.pdf>

Rosas, W. (2018). *Eficiencia de la planta Lengua de Suegra (Sansevieria trifasciata) para la fitoremediación de los gases interiores (CO, SO₂, NO₂) presentes en la I.E.P Isaac Newton, SJL-2018”.*

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/20577>

Rubio, A. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del parque naturallos alcornocales.*

[digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La densidad aparente en suelos forestales .pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales.pdf)

Salamanca, A., & Sedeghian, S. (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de zona cafetera colombiana.*
https://www.researchgate.net/publication/281442048_LA_DENSIDAD_APARENTE_Y_SU_RELACION_CON_OTRAS_PROPIEDADES_EN_SUELOS_DE_LA_ZONA_CAFETERA_COLOMBIANA

SANIZO, R., MACHACA, R., PINEDA, L., VERA, A., RIVERA, H., & RAMOS, R. (2019). *PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CON PRESENCIA DE HG “Hg” EN DISTRITO DE ANANEA*
<https://es.scribd.com/document/425846726/Proyecto-Remediacion-de-Suelos>.

Saravanan, A. (2019). *Rizorremediación: una herramienta prometedora para la eliminación de contaminantes del suelo: una revisión.*
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S18700462201100020002

Shelden, M., & Munns, R. (2023). *Plasticidad del sistema radicular de los cultivos para mejorar los rendimientos en suelos salinos*.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1120583>

Sitarska, M., Traczewska, T., Filarowska, W., Holtra, A., Wojdyła, D., & Lorenz, B. (2023). *Phytoremediation of mercury from water by monocultures and mixed cultures pleustophytes*.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103529>

Statista Research Department (SRD). (2022). *Países líderes en la producción de oro a nivel mundial en 2021*.
<https://es.statista.com/estadisticas/635361/paises-lideres-en-la-produccion-de-oro-a-nivel-mundial/#statisticContainer>

Avenue, S. (2021). *Cómo cuidar la Sansevieria o Dracaena trifasciata*.
<https://succulentavenue.com/sansevieria-dracaena-trifasciata-lengua-de-suegra/>

Thangavel, p., & Subharam, C. (2004). *Phytoextraction Role of hyperaccumulators in metal contaminated soils*.
https://www.researchgate.net/publication/284396760_Phytoextraction_Role_of_Hyperaccumulators_in_Metal_Contaminated_Soils

The Observatoty of Economic Complexity (OEC). (2021). *Oro en colombia*.
<https://oec.world/es/profile/hs/gold#:~:text=En%202021%2C%20Oro%20fu%C3%A9%20el%20total%20de%20comercio%20mundial.>

Torres, C., Etchevers, J., Fuentes, M., Govaerts, B., León, F., & Herrera, J. (2013). *Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000100071

USDA. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*.
<https://studylib.es/doc/9237217/gui%C3%A1-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-la-calidad-y-salud-del-suelo->

Vargas, H., Vidal, J., & Marrugo, J. (2014). *Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio*

del aji (Capsicum annuum).

<https://www.scielo.org/pdf/rsap/2014.v16n6/897-909/es>

Vidal, J., Marrugo, J., Jaramillo, B., & Perez, L. (2010). *Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (Cecropia peltata).* [n27a07 \(Remediacion con guarumo\).pdf](#)

Villanueva, A., Gamez, L., & Rolando, S. (2023). *Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) mediante el uso de “Zea Mays L.” Una revisión sistemática.*

<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/34035>

Wang, J., Feng, X., Anderson, C., Xing, Y., & Shang, L. (2012). *Remediation of mercury contaminated sites – A review.*

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.035>

Wheeler, C., & Miller, I. (1990). *Current and potential uses of actinorhizal plants in Europe*

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-633210-0.X5001-1>

Zhang, S., Pingru, L., Yun, X., & Xinping, G. (2011). *Efectos de la labranza y el acolchado plástico sobre el agua del suelo, el crecimiento y el rendimiento del maíz sembrado en primavera.*

<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.11.006>

Anexos

Anexos A. Presupuesto

| RUBRO | JUSTIFICACIÓN | UNIVERSIDAD | | CONTRAPARTIDA | | VALOR TOTAL |
|---------------------------|---|-------------|------------|---------------|-----------|-------------|
| | | MARIANA | | EFECTIVO | ESPECIE | |
| | | EFECTIVO | ESPECIE | | | |
| Transporte y alimentación | Movilización hasta laboratorios de la universidad ida y vuelta | | | 950.000 | | 950.000 |
| recursos humanos | Horas del asesor y estudiante | | 560.000 | | 4.980.000 | 5.540.000 |
| Equipos | Balanzas, conductímetro, hornos, macetas, estufas, espectrofotómetro de absorción atómica etc. | | 18.000.000 | | | 18.000.000 |
| Materiales | Elementos de bioseguridad (bata, guantes, tapabocas, cofias) materiales para la toma de muestra palas, Plantas, costales, metro, etc. | | | 600.000 | | 600.000 |
| Software | Licencias de los softwares a utilizar que son Office y ArcGIS | | 304.000 | | | 304.000 |
| Bibliografía | Libros y base de datos | | | 70.000 | | 70.000 |
| Eventos académicos | Congresos | 800.000 | | | | 800.000 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|-----------|------------|-----------|-----------|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|-----------|
| Publicación y divulgación | Eventos inciertos | 2.000.000 | | | | | | | | | | | | 2.000.000 |
| Salidas de campo | Toma de la muestra en el sitio de actividad minera | | | | | 1.000.000 | | | | | | | | 1.000.000 |
| TOTAL | | 2.800.000 | 18.864.000 | 2.620.000 | 4.980.000 | 28.464.000 | | | | | | | | |

Anexos B. Cronograma

| Objetivos | Actividades | Meses | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| Realizar el proceso de adaptación de la especie vegetal <i>Dracaena trifasciata</i> a las condiciones específicas del medio contaminado presente en los suelos mineros. | Identificación de las especies vegetales | | | | | | | | | | | | | | |
| | Revisión secundaria de cada una de las especies vegetales | | | | | | | | | | | | | | |
| | Adecuar la zona donde se realizará el proceso de adaptación | | | | | | | | | | | | | | |
| | Obtener la especie vegetal <i>Dracaena trifasciata</i> , atmómetro, compostera, suelo abonado etc. | | | | | | | | | | | | | | |
| | Plantar la <i>dracaena trifasciata</i> e instalación del atmómetro. | | | | | | | | | | | | | | |
| | Medición de la evapotranspiración del agua y riego con agua desclorada. | | | | | | | | | | | | | | |
| | Medición de la evapotranspiración del agua y riego con agua desclorada y cloruro de Hg II. | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|---|---|--|--|
| Caracterización del suelo control, con el fin de obtener información sobre sus propiedades físicas – químicas. | Visitar la zona de estudio | | |
| | Realizar la calicata 1m*1m*1m | | |
| | Reconocimiento del suelo. | | |
| | Tomar muestras de suelo. | | |
| | Traslado de muestras al laboratorio. | | |
| | Medición de los parámetros fisicoquímicos del suelo sin contaminar y control. | | |
| | Análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo. | | |
| Analizar la eficiencia de las especies vegetales <i>Dracaena trifasciata</i> , <i>Helianthus annuus</i> y <i>Zea mays</i> en el proceso de fitoextracción hacia un suelo contaminado. | Obtener materiales para iniciar el proceso de fitoextracción. | | |
| | Sembrar las plantas en sus respectivas macetas y monitoreo constante. | | |
| | Agrega dosis única de sustancia quelante (EDTA) | | |
| | Realizar fertirriego cada dos días con irricol inicio. | | |
| | Toma y traslado de muestras al laboratorio a los 2 y 3 meses. | | |
| | Medición de los parámetros fisicoquímicos. | | |
| | Análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo. | | |
| | Análisis estadístico de los resultados obtenidos después de las mediciones | | |

realizadas al suelo, luego de la implementación de la fitoextracción mediante el uso del programa Sigma Plot 12.0.

Anexos C. *Quince días de implementación del proceso de fitoextracción*



Anexos D. *Dos meses de implementación del proceso de fitoextracción*



Anexos E. *Tres meses de implementación del proceso de fitoextracción*



Anexos F: Análisis estadístico del pH

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.211 | 2.396 | 0.019 | Yes | T3 vs. T0 | 0.617 | 7.008 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.610 | 6.937 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.322 | 3.657 | 0.002 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.316 | 3.586 | 0.002 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.295 | 3.351 | 0.003 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.00622 | 0.0707 | 0.944 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.176 | 2.004 | 0.049 | Yes | T3 vs. T0 | 0.674 | 7.654 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.576 | 6.544 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.375 | 4.260 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.299 | 3.394 | 0.004 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.277 | 3.150 | 0.005 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.0977 | 1.110 | 0.271 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.215 | 2.439 | 0.017 | Yes | T3 vs. T0 | 0.674 | 7.654 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.576 | 6.544 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.375 | 4.260 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.299 | 3.394 | 0.004 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.277 | 3.150 | 0.005 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.0977 | 1.110 | 0.271 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.268 | 3.043 | 0.003 | Yes | T3 vs. T0 | 0.674 | 7.654 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.576 | 6.544 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.375 | 4.260 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.299 | 3.394 | 0.004 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.277 | 3.150 | 0.005 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.0977 | 1.110 | 0.271 | No |

Anexos G: Análisis estadístico de la CE

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.986 | 28.615 | <0.001 | Yes | T0 vs. T1 | 0.568 | 16.474 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T3 | 0.567 | 16.439 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 0.519 | 15.075 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 0.518 | 15.041 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.0482 | 1.399 | 0.306 | No |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.00118 | 0.0342 | 0.973 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.0580 | 1.682 | 0.097 | No | T0 vs. T3 | 1.505 | 43.680 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T1 | 1.496 | 43.406 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 1.280 | 37.148 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 1.271 | 36.873 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.225 | 6.533 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.00946 | 0.274 | 0.785 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.809 | 23.481 | <0.001 | Yes | T0 vs. T3 | 1.505 | 43.680 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T1 | 1.496 | 43.406 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 1.280 | 37.148 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 1.271 | 36.873 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.225 | 6.533 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.00946 | 0.274 | 0.785 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.0473 | 1.374 | 0.174 | No | T0 vs. T3 | 1.505 | 43.680 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T1 | 1.496 | 43.406 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 1.280 | 37.148 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 1.271 | 36.873 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.225 | 6.533 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.00946 | 0.274 | 0.785 | No |

Anexos H: Análisis estadístico de la Porosidad

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 9.578 | 10.781 | <0.001 | Yes | T2 vs. T1 | 9.656 | 10.869 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T1 | 7.974 | 8.975 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 6.579 | 7.405 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T3 | 4.897 | 5.512 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 3.077 | 3.464 | 0.002 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 1.682 | 1.894 | 0.063 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 5.477 | 6.165 | <0.001 | Yes | T2 vs. T0 | 10.612 | 11.945 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 7.081 | 7.971 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 6.338 | 7.135 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 4.274 | 4.810 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 3.531 | 3.974 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 2.808 | 3.161 | 0.002 | Yes |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 0.648 | 0.729 | 0.468 | No | T1 vs. T0 | 9.555 | 8.371 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 8.453 | 7.406 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 7.020 | 6.150 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 2.535 | 2.221 | 0.087 | No |
| | | | | | T2 vs. T3 | 1.433 | 1.255 | 0.382 | No |
| | | | | | T1 vs. T2 | 1.102 | 0.965 | 0.338 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 0.408 | 0.459 | 0.648 | No | T1 vs. T0 | 15.608 | 13.674 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 8.262 | 7.238 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 7.899 | 6.920 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 7.709 | 6.754 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 7.346 | 6.436 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 0.363 | 0.318 | 0.751 | No |

Anexos I: Análisis estadístico de la CIC

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 1.257 | 1.101 | 0.275 | No | T1 vs. T0 | 9.555 | 8.371 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 8.453 | 7.406 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 7.020 | 6.150 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 2.535 | 2.221 | 0.087 | No |
| | | | | | T2 vs. T3 | 1.433 | 1.255 | 0.382 | No |
| | | | | | T1 vs. T2 | 1.102 | 0.965 | 0.338 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 7.310 | 6.404 | <0.001 | Yes | T1 vs. T0 | 15.608 | 13.674 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 8.262 | 7.238 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 7.899 | 6.920 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 7.709 | 6.754 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 7.346 | 6.436 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 0.363 | 0.318 | 0.751 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.513 | 0.449 | 0.655 | No | T1 vs. T0 | 9.555 | 8.371 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 8.453 | 7.406 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 7.020 | 6.150 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 2.535 | 2.221 | 0.087 | No |
| | | | | | T2 vs. T3 | 1.433 | 1.255 | 0.382 | No |
| | | | | | T1 vs. T2 | 1.102 | 0.965 | 0.338 | No |

| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
|--|---------------|-------|-------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 1.582 | 1.386 | 0.170 | No | T1 vs. T0 | 15.608 | 13.674 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 8.262 | 7.238 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 7.899 | 6.920 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 7.709 | 6.754 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 7.346 | 6.436 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T3 | 0.363 | 0.318 | 0.751 | No |

Anexos J: Análisis estadístico de la humedad

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.742 | 13.797 | <0.001 | Yes | T1 vs. T2 | 0.0788 | 1.464 | 0.618 | No |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.0761 | 1.414 | 0.587 | No |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.0655 | 1.218 | 0.644 | No |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.0628 | 1.168 | 0.574 | No |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.0132 | 0.246 | 0.962 | No |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.00270 | 0.0501 | 0.960 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.754 | 14.020 | <0.001 | Yes | T2 vs. T0 | 0.493 | 9.168 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.482 | 8.958 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 0.416 | 7.726 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.404 | 7.517 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.0775 | 1.441 | 0.285 | No |
| | | | | | T2 vs. T3 | 0.0113 | 0.209 | 0.835 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M3 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 1.249 | 23.210 | <0.001 | Yes | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M4 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 1.161 | 21.587 | <0.001 | Yes | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Anexos K: Análisis estadístico de la densidad aparente

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|-------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.116 | 8.782 | <0.001 | Yes | T1 vs. T2 | 0.168 | 12.685 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.131 | 9.916 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.124 | 9.367 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.0873 | 6.598 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.0439 | 3.318 | 0.003 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.0366 | 2.769 | 0.007 | Yes |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.0374 | 2.830 | 0.006 | Yes | T3 vs. T2 | 0.214 | 16.148 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.196 | 14.842 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.151 | 11.427 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.0625 | 4.721 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T0 | 0.0452 | 3.416 | 0.002 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.0173 | 1.306 | 0.196 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M3 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.00890 | 0.673 | 0.504 | No | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M4 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.0913 | 6.905 | <0.001 | Yes | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Anexos L: Análisis estadístico de la materia orgánica

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|---|---------------|-------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 1.106 | 4.265 | <0.001 | Yes | T1 vs. T0 | 0.600 | 2.315 | 0.135 | No |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.508 | 1.959 | 0.244 | No |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.436 | 1.682 | 0.336 | No |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.164 | 0.633 | 0.896 | No |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.0923 | 0.356 | 0.923 | No |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.0717 | 0.277 | 0.783 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 2.703 | 10.423 | <0.001 | Yes | T1 vs. T0 | 2.198 | 8.473 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 2.087 | 8.046 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 1.558 | 6.008 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.639 | 2.465 | 0.048 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.529 | 2.038 | 0.089 | No |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.111 | 0.426 | 0.671 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.780 | 3.009 | 0.004 | Yes | T1 vs. T0 | 2.198 | 8.473 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 2.087 | 8.046 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 1.558 | 6.008 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.639 | 2.465 | 0.048 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.529 | 2.038 | 0.089 | No |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.111 | 0.426 | 0.671 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 1.237 | 4.771 | <0.001 | Yes | T1 vs. T0 | 2.198 | 8.473 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 2.087 | 8.046 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 1.558 | 6.008 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.639 | 2.465 | 0.048 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.529 | 2.038 | 0.089 | No |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.111 | 0.426 | 0.671 | No |

Anexos M: Análisis estadístico de la densidad real

| Comparisons for factor: MUESTREO within T0 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M1 | | | | |
|--|---------------|-------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 0.178 | 6.048 | <0.001 | Yes | T0 vs. T1 | 0.109 | 3.716 | 0.003 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T1 | 0.104 | 3.530 | 0.004 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T1 | 0.0579 | 1.971 | 0.196 | No |
| | | | | | T0 vs. T3 | 0.0512 | 1.745 | 0.236 | No |
| | | | | | T2 vs. T3 | 0.0458 | 1.559 | 0.233 | No |
| | | | | | T0 vs. T2 | 0.00547 | 0.186 | 0.853 | No |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T1 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.281 | 9.555 | <0.001 | Yes | T1 vs. T0 | 0.349 | 11.887 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.259 | 8.826 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.188 | 6.389 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.161 | 5.499 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.0977 | 3.327 | 0.003 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.0899 | 3.062 | 0.003 | Yes |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T2 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 0.0107 | 0.364 | 0.717 | No | T1 vs. T0 | 0.349 | 11.887 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.259 | 8.826 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.188 | 6.389 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.161 | 5.499 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.0977 | 3.327 | 0.003 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.0899 | 3.062 | 0.003 | Yes |
| Comparisons for factor: MUESTREO within T3 | | | | | Comparisons for factor: TRATAMIENTO within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M2 vs. M1 | 0.133 | 4.522 | <0.001 | Yes | T1 vs. T0 | 0.349 | 11.887 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T0 | 0.259 | 8.826 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T2 | 0.188 | 6.389 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T2 vs. T0 | 0.161 | 5.499 | <0.001 | Yes |
| | | | | | T3 vs. T2 | 0.0977 | 3.327 | 0.003 | Yes |
| | | | | | T1 vs. T3 | 0.0899 | 3.062 | 0.003 | Yes |

Anexo N: Análisis estadístico de la concentración de mercurio

| Comparisons for factor: Muestreo within SC Solo | | | | | Comparisons for factor: Tratamiento within M1 | | | | |
|---|---------------|--------|--------|--------|---|---------------|--------|--------|--------|
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 4.760 | 10.633 | <0.001 | Yes | SC Solo vs. SC Maiz | 5.647 | 12.614 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Girasol | 4.930 | 11.013 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Dracaena | 2.873 | 6.419 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Maiz | 2.773 | 6.195 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Girasol | 2.057 | 4.594 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Girasol vs. SC Maiz | 0.717 | 1.601 | 0.129 | No |
| Comparisons for factor: Muestreo within SC Maiz | | | | | Comparisons for factor: Tratamiento within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 20.953 | 46.808 | <0.001 | Yes | SC Solo vs. SC Maiz | 21.840 | 48.789 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Maiz | 18.747 | 41.878 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Girasol | 18.240 | 40.747 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Girasol | 15.147 | 33.836 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Girasol vs. SC Maiz | 3.600 | 8.042 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Dracaena | 3.093 | 6.910 | <0.001 | Yes |
| Comparisons for factor: Muestreo within SC Dracaena | | | | | Comparisons for factor: Tratamiento within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 4.980 | 11.125 | <0.001 | Yes | SC Solo vs. SC Maiz | 21.840 | 48.789 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Maiz | 18.747 | 41.878 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Girasol | 18.240 | 40.747 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Girasol | 15.147 | 33.836 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Girasol vs. SC Maiz | 3.600 | 8.042 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Dracaena | 3.093 | 6.910 | <0.001 | Yes |
| Comparisons for factor: Muestreo within SC Girasol | | | | | Comparisons for factor: Tratamiento within M2 | | | | |
| Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 | Comparison | Diff of Means | t | P | P<0.05 |
| M1 vs. M2 | 18.070 | 40.367 | <0.001 | Yes | SC Solo vs. SC Maiz | 21.840 | 48.789 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Maiz | 18.747 | 41.878 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Girasol | 18.240 | 40.747 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Dracaena vs. SC Girasol | 15.147 | 33.836 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Girasol vs. SC Maiz | 3.600 | 8.042 | <0.001 | Yes |
| | | | | | SC Solo vs. SC Dracaena | 3.093 | 6.910 | <0.001 | Yes |