

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“INFLUENCIA DEL TIEMPO EN LA EFECTIVIDAD
DE LA VITRIFICACIÓN PARA LA INERTIZACIÓN
DE SUELOS AGRÍCOLAS CONTAMINADOS POR
METALES PESADOS (Pb, Cd y Fe)”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autores:

Marco Alonso Pedro Vasquez
Mary Linda Cardenas de la Cruz

Asesor:

Mg. Lic. Haniel Josue Torres Joaquin
<https://orcid.org/0000-0001-9659-4250>

Trujillo - Perú

2024

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	DENISSE MILAGROS ALVA MENDOZA
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	JAIRO PINEDO TAQUIA
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	HANIEL JOSUE TORRES JOAQUIN
	Nombre y Apellidos

Jurado Suplente	ALBERTO SANTIAGO PALACIOS MIÑANO
	Nombre y Apellidos

INFORME DE SIMILITUD

11% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.




Filtered from the Report

- Bibliography

Exclusions

- 1 Excluded Source
- 7 Excluded Matches

Top Sources

- 7%  Internet sources
- 4%  Publications
- 6%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**
2608 suspect characters on 26 pages
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 7%  Internet sources
- 4%  Publications
- 6%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Student papers	
	Universidad Privada del Norte	6%
2	Internet	
	dehesa.unex.es	4%
3	Internet	
	repositorio.unac.edu.pe	<1%
4	Internet	
	docs.google.com	<1%

DEDICATORIA

El resultado de este proyecto está dedicado a mi familia, mis padres y hermanos, quienes me han apoyado siempre. Quiero dedicar este trabajo a mis padres Juanita y Royar, porque ellos me han inculcado principios, valores, perseverancia y empeño en cada actividad que realice, así mismo me han enseñado a ser la persona que soy hoy en día. Todo se los debo a ellos que a pesar de la distancia me apoyan, aconsejan y demuestran que están conmigo siempre.

Dedico esta investigación a mis hermanos Manuel y Emir porque me impulsan a ser mejor persona cada día. A Manuel que me alienta a terminar la carrera y a su manera demuestra lo orgulloso que está de mí, apoyándome sin pedir nada a cambio, a Emir que con sus ocurrencias me da fuerzas para no rendirme nunca y alcanzar mis metas. A Cooper mi fiel compañero, nunca me ha dejado sola.

Cardenas de la Cruz, Mary Linda

Este como todos mis logros va dedicado a mis padres Pedro Moreno Marco Antonio y Vasquez Angulo Laura, por cuidarme, apoyarme y guiarme a lo largo de toda mi vida, de igual forma a mis hermanos Pedro Vasquez Irvin Jordan y Pedro Vasquez Fabricio Gabriel, los cuales siempre me brindan su apoyo y están conmigo en los momentos importantes, acompañándome, sacándome una sonrisa y disminuyendo los momentos de tristeza, siempre los tengo presentes.

Pedro Vasquez, Marco Alonso

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer antes que todo a Dios, por permitirme realizar este trabajo, así mismo agradecerle por todo lo que me ha brindado a lo largo estos años. Quiero agradecer a mis padres Juanita y Royar porque gracias a ellos tengo todo, gracias por siempre brindarme su apoyo y sobre todo su amor. Agradecer a mis hermanos Manuel y Emir por ser la fuente de motivación que necesito para mejorar día a día. Quiero agradecer a Cooper, por ser mi amigo fiel y acompañarme siempre. De igual forma a los amigos y compañeros con los cuales compartí 5 años y una linda experiencia en la universidad.

Quiero agradecer a nuestro asesor Haniel Torres, que está encargado de guiarnos a realizar esta revisión sistemática, por el apoyo brindado y la amabilidad con la cual nos enseña y al Ingeniero Enrique Ugaz, por su apoyo y enseñanza. Así mismo a Alonso, mi enamorado, mejor amigo y compañero de tesis, por su apoyo siempre, por la paciencia, las risas y todo lo compartido, por estar presente en cada momento e impulsarme a mejorar cada día como persona.

Cardenas de la Cruz, Mary Linda

En primer lugar, agradecer a Dios por todo lo vivido y todas las experiencias que he pasado dentro de la Universidad, la cual me permitió crecer como persona y como estudiantes, las oportunidades y los compañeros, agradezco especialmente las personas que estuvieron ahí y marcaron mi etapa en la universidad, de igual forma agradecer a nuestro asesor quien nos brindó siempre atención, facilidades y recursos para poder realizar este trabajo.

También quiero agradecer directamente a mis padres los cuales siempre tuvieron presentes mis estudios, ante todo, gracias por el apoyo dado en la parte emocional como económica, de igual forma agradezco a mi compañera de tesis y mi enamorada, por los momentos divertidos, los momentos de preocupación y los momentos de estrés, los cuales supimos superar, pero por, sobre todo, por la compañía y el apoyo; muchas gracias Lindita.

Marco Alonso Pedro Vasquez

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA -----	4
AGRADECIMIENTO-----	5
TABLA DE CONTENIDO-----	6
ÍNDICE DE TABLAS -----	8
ÍNDICE DE FIGURAS -----	9
RESUMEN -----	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN -----	12
1.1. Realidad problemática -----	12
1.2. Bases teóricas -----	14
1.3. Formulación del problema-----	19
1.4. Objetivos-----	20
1.5. Hipótesis -----	20
1.6. Justificación -----	21
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA-----	22
2.1 Tipo de estudio-----	22
2.2 Población, muestra y muestro -----	22
2.3 Técnicas e instrumentos-----	25
2.4 Materiales e instrumentos-----	25
CAPÍTULO III: RESULTADOS -----	30
3.1 Eficiencia del tiempo en la concentración de los metales pesados -----	30
3.2 Eficiencia del tiempo de acuerdo al proceso de vitrificación -----	34
3.3 Costo del proceso de vitrificación -----	48
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES -----	49
4.1 El tiempo en la vitrificación de metales pesados -----	49
4.2 Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo durante el proceso de vitrificación	49
4.3 Tiempo óptimo para la correcta inertización del suelo contaminado-----	50

1.7. 4.4 Costro aproximado del proceso de vitrificación -----	51
Limitaciones: -----	51
Conclusiones: -----	52
Referencias -----	53
ANEXOS -----	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Puntos de muestreo.....	23
Tabla 2: Parámetros fisicoquímicos del suelo.....	30
Tabla 3: Prueba control (concentración inicial).....	30
Tabla 4: Concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h).....	31
Tabla 5: Análisis estadístico de la concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h).....	31
Tabla 6: Porcentaje de remoción final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h).....	32
Tabla 7: Análisis del porcentaje de remoción final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h).....	33
Tabla 8: Vitrificación del plomo mediante el tiempo.....	34
Tabla 9: Rango de inertización en la vitrificación de plomo (Pb).....	34
Tabla 10: Análisis estadístico de la concentración final de Pb.....	35
Tabla 11: Vitrificación del cadmio mediante el tiempo.....	36
Tabla 12: Rango de inertización en la vitrificación del cadmio (Cd).....	36
Tabla 13: Análisis estadístico de la concentración final de Cd.....	36
Tabla 14: Vitrificación del hierro mediante el tiempo.....	37
Tabla 15: Rango de inertización en la vitrificación del hierro (Fe).....	38
Tabla 16: Análisis estadístico de la concentración final de Fe.....	38
Tabla 17: Costos del proceso de vitrificación.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del distrito de Sayapullo – provincia de Gran Chimú.....	23
Figura 2: Puntos de muestreo - Sayapullo	24
Figura 3: Zona de muestreo.....	24
Figura 4: Diagrama de flujo	29
Figura 5: Gráfico estadístico de la concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)	32
Figura 6: Gráfico estadístico de porcentaje de remoción final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)	33
Figura 7: Porcentaje de remoción de Pb respecto a la concentración inicial.....	35
Figura 8: Porcentaje de remoción de Cd respecto a la concentración inicial	37
Figura 9: Porcentaje de remoción de Fe respecto a la concentración inicial:.....	39
Figura 10: Estadísticas para una muestra de 6h	39
Figura 11: Prueba de validación de hipótesis para una muestra de 6h.....	40
Figura 12: Estadísticas para una muestra de 8h.....	40
Figura 13: Prueba de validación de hipótesis para una muestra de 8h.....	40
Figura 14: Estadísticas para una muestra de 12h.....	41
Figura 15: Prueba de validación de hipótesis para una muestra de 12h.....	41
Figura 16: Correlaciones entre Inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y Tiempo de vitrificación (6h).....	41
Figura 17: Correlaciones entre Inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y Tiempo de vitrificación (8h).....	42
Figura 18: Correlaciones entre Inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y Tiempo de vitrificación (12h).....	42
Figura 19: Correlaciones entre variable Inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h).....	43
Figura 20: Resumen del modelo de la variable.....	43
Figura 21: ANOVAa.....	44
Figura 22: Regresión lineal.	44
Figura 23: Resumen del modelo de la variable.....	45

Figura 24: ANOVA.....	45
Figura 25: Regresión lineal.	46
Figura 26: Resumen del modelo de la variable.....	46
Figura 27: ANOVA.....	47
Figura 28: Regresión lineal.	47
Figura 29: Efluentes del Rio San Jorge	60
Figura 30: Recolección de las muestras	60
Figura 31: Tamizado de las muestras	61
Figura 32: Muestra 0.....	61
Figura 33: Análisis de las muestras	62
Figura 34: M1, M2 y M3.....	62
Figura 35: M1, M2 Y M3 listas para lectura	63

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo evaluar la influencia del tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe, producto de la minería ilegal en el distrito de Sayapullo. Esta investigación es de tipo experimental, se realizaron análisis fisicoquímicos a las muestras tomadas, para el proceso de vitrificación se tomó en cuenta 3 tiempos, 6; 8 y 12 horas, proceso ex situs. Como resultado se obtuvo que el tiempo óptimo y con mejores resultados fue 12 horas, reduciendo así el 70.41 % (Pb), el 98.70 % (Cd) y el 59.78 % (Fe). Por medio del programa Spss, se realizó la prueba de validación de hipótesis, siendo el punto de factor de cada uno tiempo (0.073, 0.184 y 0.461) respectivamente, mayor a Alpha (0,05). Se realizó la prueba de correlación bivariado, presentó una alta correlación de 0.967 entre concentración (Pb, Cd y Fe) y vitrificación (6h,8h y 12h). Por medio de la regresión lineal quedó demostrado que en promedio el 98.3% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente. Concluyendo de esta manera que el tiempo influye significativamente en el proceso de vitrificación, así mismo crean una relación directa.

PALABRAS CLAVES: Vitrificación, metales pesados, influencia e inertización

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Principalmente en los países en vías de desarrollo, la minería ilegal es una de las actividades antropogénicas más contaminantes, debido a la deficiente evaluación y regulación del medio ambiente (Salgado et al., 2023). Estas actividades arrojan elementos potencialmente tóxicos al ambiente, causando degradación de los ecosistemas presentes por los metales pesados (Rodríguez et al., 2003). Estos tienen la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse a través de la cadena trófica, ya que no son biodegradables, afectando así el área de influencia y zonas aledañas. (Loza et al., 2019). Aproximadamente el 20% de la producción mundial del oro, diamantes, estaños, tantalio y el 80% de piedras preciosas provienen de la minería ilegal (Lavado et al., 2023). Así mismo entre 2019 y 2020 Brasil exportó 174 toneladas de oro, sin embargo, el 38% era de origen desconocido (Rodríguez et al., 2003). A nivel nacional aumentó la minería ilegal, por ende, la contaminación en el área de influencia.

Según el Ministerio de Energía y Minas (2022), el cobre oro, zinc y hierro son los principales productos exportados, representando el 88.5% del valor total de exportaciones mineras, sin embargo, muchos mineros son informales. Se considera que para producir un 1kg de oro es necesario 1.5 kg de mercurio, cuyo destino final son los recursos hídricos aledaños, terminando así de contaminar el agua, aire y suelo. (Loza et al., 2020). Por consiguiente, la acumulación de metales pesados en el suelo aumenta velozmente, perjudicando así en la fertilidad, rendimiento, calidad y productividad de diversos cultivos, en consecuencia, afecta negativamente el sistema agroalimentario. (Escobar et al., 2023). Ya que los metales pesados contenidos en el suelo pueden ser absorbidos por las plantas, de esta manera ingresar a la cadena trófica. (Motasem et al., 2022). Existen diversas tecnologías de remediación, sin embargo, generan un alto costo para la recuperación del suelo.

En este sentido, el proceso de inertización presenta una opción para inertizar suelos contaminados, estabilizando de esta manera los contaminados presentes en el suelo, entre estas técnicas se encuentra la vitrificación. (Torres et al., 2022). La vitrificación es un procedimiento térmico, mediante altas temperaturas se destruyen los componentes

orgánicos e inertizan los contaminantes minerales, formando sólidos semejantes al vidrio, estabilizando de esta manera el suelo tratado. (Kim et al., 2018). Así mismo los metales pesados son encapsulados en la matriz vítrea. (Liu et al., 2018). Este proceso está limitado por diversos parámetros, entre ellos el contenido de materia orgánica, la humedad del suelo, la temperatura y el tiempo. (Xiaoyan et al., 2020).

Dellisante et al., (2008). En su investigación Remediación de materiales que contienen amianto mediante vitrificación por calentamiento Joule realizada en un aparato pre-piloto, cuyo objetivo fue brindar detalles sobre la vitrificación por efecto Joule, la metodología fue el uso de una planta a escala pre-piloto diseñada para suelos que contienen amianto, logrando un calentamiento progresivo a 1600 °C, provocando una suición completa, obteniendo como resultados que la parte externa del volumen calentado no estaba fundida pero carecía de amianto, vitrificando así 15g. Concluyendo así que la ampliación de la aplicación en campo es un tratamiento industrial óptimo para toneladas de material contaminado.

Así mismo Simbaña (2021). En su investigación Inertización de metales pesados de un lodo de la industria metalmeccánica, utilizando el proceso de vitrificación ex situ. Cuyo objetivo fue inertizar metales pesados de un lodo de la industria metalmeccánica. La metodología usada fue EPA 1311. Cd, Ni, Pb, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Hg, Co, Cr y Ag, fueron los metales encontrados, los cuales pasaban los límites máximos permisibles, la temperatura fue de 1063 °C, durante una hora, obteniendo el 70% de lodo vitrificado, logrando así inertizar el 100% de los metales estudiados. Concluyendo de esta manera que la vitrificación es una alternativa eficaz para eliminar metales, así mismo forma parte de la economía circular.

Otro punto es la investigación de Trifunovic (2021). Vitrificación como método de remediación de suelos. Cuyo objetivo fue describir el proceso de vitrificación, como una alternativa para remediar suelos a grandes escalas. La metodología empleada es netamente descriptiva, mediante revisión bibliográfica. Cuyos resultados para la vitrificación ex situs, indican que la vitrificación resulta ser resistente a la liberación de metales pesados, al ambiente después de un proceso de vitrificación, cuyos resultados encontrados varían entre el 33 a 75% de inertización de metales como el plomo, cuya temperatura recomendada es de 1400 °C. Concluyendo de esta manera que la vitrificación es aplicable para diferentes tipos de suelos contaminados y residuos peligrosos, según los resultados analizados.

En el estudio preliminar de Saenz, (2006). Proceso de vitrificación de residuos peligrosos por vía térmica. El cual tuvo como objetivo realizar un objetivo técnico preliminar de la vitrificación como alternativa tecnológica para el tratamiento de residuos peligrosos en Colombia. Realizó una revisión bibliográfica, así mismo el análisis experimental, mediante una temperatura de 1300 °C a 1800 °C, teniendo una mezcla de 75/25 y 50/25 con lodos. Como resultados obtuvo la reducción del 58.9 % de Cr y el 51.8 % de Fe, evidenciándose una matriz vitrificada en las muestras que alcanzaron la temperatura de 1200 °C, concluyendo así que el proceso de vitrificación reduce la concentración de metales pesados presentes en el suelo, sin embargo, es necesario analizar la temperatura durante el proceso.

A nivel nacional, Aroni (2023). En su estudio Vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la Cuenca del Río Moche, Quiruvilca, 2022. Cuyo objetivo fue desarrollar la técnica de vitrificación ex situs para la inertización de relaves mineros con la aplicación de enmiendas en la cuenca alta del Río Moche. Cuyo diseño fue experimental, utilizando el método del ICP, cuyas muestras se trataron a 1100 °C en diferentes tiempos, 1 y 5 horas. Obteniendo resultados como pasar de 1500 mg/kg a 200 mg/kg de Pb, As de 2000 mg/kg a 200 mg/kg en el periodo de 5 horas. Concluyendo de esta manera que la vitrificación mostró una reducción considerable de los metales estudiados, así mismo la aplicación del humus incrementa los nutrientes en el suelo.

1.2. Bases teóricas

1.2.1 La vitrificación de suelos agrícolas

La vitrificación es proceso por el cual se transforma un material en un sólido con una estructura amorfa similar al vidrio, exponiendo al material a altas temperaturas entre 1000 °C a 1700 °C. (Dorronsoro et al., 2021). La vitrificación es usada en también para fundir suelos contaminados por metales pesados, como pueden ser los suelos agrícolas, de esta manera se crean una capa inerte de vidrio en la cual quedan encapsulados los metales, de esta manera se reduce la lixiviación de dichos metales presentes en suelos contaminados y sus principales mecanismos de estabilización son los enlaces covalentes de O y enlaces iónicos. (Cañada et al., 2009).

1.2.2 Inertización

Se dice que un material es inerte cuando este no cuenta con capacidad de reaccionar, se encuentra inmóvil o paralizado y que este no presenta vida, de manera química un material es inerte cuando no presenta reacción química alguna (Salguero, 2017). La inertización de residuos contaminantes consiste en incorporar los contaminantes a una matriz con características inertes, esto mediante un proceso pudiendo ser físico o químico. De esta manera se reduce la potencialidad que estos tienen como contaminantes y su peligrosidad, haciendo que sea posible su uso en otros ámbitos o su reuso (Rodríguez, 2008).

1.2.3 Metales pesados

Son elementos químicos que presentan una alta densidad (mayor de 5 g/cm³), además de ello tienen su peso atómico comprendido entre 63.55 u y 200.59 u. Tienen un carácter acumulativo conociéndolos, así como contaminantes tóxicos para los seres vivos como para el ambiente. (MINAM, 2024).

Entre ellos tenemos:

- **Plomo**

El plomo es un metal pesado de número atómico 82 en la tabla periódica, de color gris azulado, tiene baja temperatura de fusión. Es un metal altamente tóxico que ha causado contaminación ambiental y problemas de salud en los seres humanos. Diversas actividades como la minería, fundiciones, fabricación y empleo en pinturas, tuberías, plaguicidas, entre otros productos, generan exposición al plomo, que en los seres humanos termina en enfermedades cancerígenas. (OPS, 2024)

- **Cadmio**

El Cadmio es un elemento químico de número atómico 48, de color blanco con ligeros matices azulados. Se encuentra en la naturaleza en óxidos complejos, en algunas ocasiones con zinc, es comúnmente utilizado como anticorrosivo y electro estabilizador, sin embargo, es altamente tóxico en todos sus compuestos estables. Se acumula fácilmente en el suelo y en aguas

residuales, causando así la contaminación de diversos ecosistemas hasta llegar a contaminar al ser humano. (PRTR, 2024).

- **Hierro**

El hierro es un elemento químico de número atómico 26, pertenece al grupo de los metales de transición, es de color gris plateado y presenta propiedades magnéticas. Es el segundo metal más abundante de la corteza terrestre, sin embargo, no se encuentra en su forma pura, sino formando parte de diversos minerales, generalmente en forma de óxido. Este metal es esencial para el buen funcionamiento del organismo humano, pero el exceso de hierro puede ser perjudicial, así mismo puede ser altamente nocivo para el medio ambiente.

1.2.4 Lixiviación

La lixiviación es el fenómeno de desplazamiento de sustancias o compuestos debido al movimiento del agua en el suelo, produciendo así el lavado del suelo mediante la filtración del agua. Cuando el agua contaminada por metales pesados está en contacto con el suelo, los horizontes superiores del mismo pierden compuestos nutritivos, los cuales son arrastrados por el agua, el suelo se vuelve ácido, ya que se queda con los metales pesados, originando así una fuente de toxicidad. Causando severos problemas en el ambiente y en los seres vivos. (Rodríguez, 2008).

1.2.5 Influencia

La influencia es posibilidad que tiene un ente o factor externo para de alterar o condicionar el comportamiento o reacciones que presenta un material o ser vivo, por medio de un acción u acto a influir (Martínez, 2019). Durante el proceso de vitrificación podemos observar la influencia que ejercen ciertos elementos sobre otro, como la temperatura sobre la concentración de contaminantes, de igual forma la influencia que ejerce el tiempo sobre la correcta y óptima ejecución del proceso de vitrificación, siendo estas influencias en las cuales se basa el proceso de vitrificación y las encargadas de su óptimo desarrollo. (Salguero, 2018).

1.2.6 Temperatura

La temperatura al igual que el tiempo es una magnitud, con la diferencia de ser una magnitud escalar, la cual por definición es la cantidad de energía cinética que presentan una o más partículas, como puede ser una masa líquida, sólida o gaseosa, cuanto mayor es la velocidad a que se desplazan las partículas la temperatura es mayor. (Picquart y Carrasco, 2017). La temperatura en la vitrificación es el principal factor para que esta se lleve a cabo, es indispensable la presencia de elevadas temperaturas para que el proceso de vitrificación suceda, pudiendo así darse la fundición del suelo y la creación del vidrio que encapsula los contaminantes. (Pérez, 2020).

1.2.7 Tiempo

El tiempo se describe como una magnitud física la cual se utiliza como medición para la duración de algún suceso, las brechas de tiempo que existen entre un hecho y otro, así como la igualdad o simultaneidad de dos hechos o sucesos, permitiéndonos establecer un orden en la cual se presentan los hechos (pasado, presente y futuro). (Nobert, 2015). El tiempo en el proceso de vitrificación toma un rol sumamente importante, siendo este uno de los principales factores que influye directamente en la efectividad de la vitrificación, porque presenta una relación directa, para poder realizar una óptima vitrificación. (Aroni, 2023).

1.2.8 Contaminación de suelos

El suelo representa una capa que recubre todo el planeta, de igual forma este cuenta con múltiples características complejas, es polifuncional, presenta una clara estructura y se encuentra correctamente organizado. Siendo uno de los recursos más importantes que tenemos, no solo produciendo el alimento, sino que es la base en la cual se desarrolla la vida en el planeta. (Ballesta, 2017). La contaminación de suelo se da principalmente por factores antropogénicos, producto de actividades humanas como las industrias mineras, entre otras industrias que usan químicos, siendo que la toxicidad de un elemento o un compuesto químico producto de la minería y que se encuentra presente en el suelo, tiene la capacidad de dañar las funciones biológicas del suelo, matándolo biológicamente, física y químicamente, así como a las plantas y microorganismos presentes. (Galán y Romero, 2008).

1.2.9 Relaves mineros

Los relaves mineros son un conjunto sólido que está molido, el cual es el descarte y residuos químicos de los procesos realizados en la minería, este relave es muy pobre en su contenido de los metales buscados como el oro, la plata, el cobre, etc, el cual no presente un beneficio monetario para las empresas mineras. (Espín, Jarrín y Escobar, 2017). De igual forma los relaves mineros son la principal fuente de contaminación producto de la minería, siendo este el que lleva los químicos contaminantes y los metales pesados hacia los ríos, los terrenos agrícolas, etc. Siendo que su alto riesgo proviene del mal manejo que le dan a este, tanto en su manejo, como en su transporte y su tratamiento, así como los materiales sumamente tóxicos que llevan como; As, Cd, Fe, Pb, Cu, Cr, entre otros. (Menéndez y Sócrates, 2021).

1.2.10 Minería ilegal

La minería ilegal es la explotación y obtención de los metales con alta demanda, como lo son el oro, la plata, el cobre, etc. Pero de una manera sumamente descuidada con el medio ambiente, siendo realizada en lugares no autorizados, como lo son en las riberas de los ríos, cerca de lagunas o cerca a área de cultivo, ganado o cerca a poblados habitados. (Leal, 2019). La minería en las últimas décadas se ha establecido en el Perú como uno de las principales fuentes de ingreso del país siendo en 2016 el 12% del PBI del Perú, principalmente la minería informal, de igual forma influenciando un crecimiento negativo en la contaminación del suelo, así como de los ecosistemas de los lugares en los que se ha establecido. Con el uso negligente de explosivos, maquinaria pesada y químicos; así como un mal manejo de sus residuos y el incremento de mafias dedicadas a este rubro, la extorsión y la muerte de miles de personas en las minas informales. (Echave, 2016).

1.2.11 Suelo agrícola:

El suelo es un sistema dinámico complejo, que se transforma continuamente. Microorganismos degradan las rocas, posteriormente otros organismos como líquenes y musgos colonizan la roca, permitiendo la formación del suelo. Así

mismo otros organismos como lombrices, plantas colonizarán el suelo y seguirá transformándose. Existen diversos tipos de suelos, entre ellos el suelo agrícola. (UNLP, 2020). El suelo agrícola está destinado a la producción de cultivos, forrajes y pastos. Presentan buena estructura y baja compactación que permite el funcionamiento equilibrado de los ecosistemas presentes, así mismo el crecimiento de la flora presente y el desarrollo de la ganadería. (MINAM, 2017) Este suelo presenta compuestos orgánicos e inorgánicos. Visto de manera general el suelo agrícola tendrá entre 15-35% de agua, 15% de materia orgánica y 45% aproximadamente de minerales y el resto será aire. (GOB.MX, 2023)

1.2.12 ECA suelo

En el Perú, la protección del suelo está regulada por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Dichos estándares establecen los niveles máximos permitidos de contaminantes presentes en el suelo, ya que el suelo es un recurso vital para el desarrollo sostenible del país. (MINAM, 2017). En el decreto Supremo 011-2017-MINAM establece la aprobación de los ECAS para suelo, esta normativa es un referente obligatorio para el diseño y aplicación de instrumentos de gestión ambiental. Así mismo son aplicados para parámetros asociados con actividades productivas y/o extractivas. Al medir los ECA para el suelo se busca analizar la concentración o grado de elementos o parámetros físico, químicos o biológicos que pueden representar un riesgo para la salud de las personas o el ambiente, posteriormente se propone un plan de remediación.

1.3. Formulación del problema

1.3.1 Pregunta general

¿En qué medida influye el tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Cómo varía la eficacia de la vitrificación en la inertización de suelos agrícolas contaminados por plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe) a lo largo del tiempo de tratamiento?

- ¿Existen cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del suelo en función del tiempo de tratamiento con el proceso de vitrificación?
- ¿Cuál es el tiempo óptimo para la correcta inertización del suelo contaminados por plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe)
- ¿Cuál es el costo aproximado del proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe?

1.4. Objetivos

Objetivo general:

Evaluar la influencia del tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por metales pesados.

Objetivos específicos

- Analizar la variación de la eficacia de la vitrificación en la inertización de suelos agrícolas contaminados por plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe) a lo largo del tiempo de tratamiento.
- Determinar la existencia o no existencia de los cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del suelo en función del tiempo de tratamiento con el proceso de vitrificación.
- Determinar el tiempo óptimo para la correcta inertización del suelo contaminado por plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe)
- Estimar el costo aproximado del proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe.

1.5. Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

El tiempo influye significativamente en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe.

1.5.2 Hipótesis específicas

- La eficacia de la vitrificación en la inertización de suelos agrícolas contaminados por plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe) muestra una mayor eficacia a mayor sea el tiempo de tratamiento.
- El suelo presentará un cambios notorios y significativos en sus propiedades fisicoquímicas en función del tiempo de tratamiento con el proceso de vitrificación.
- El tiempo óptimo para la correcta inertización del suelo contaminado por plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe) será de 12 horas.
- La reducción de plomo (Pb), cadmio (Cd) y hierro (Fe) mediante el proceso de vitrificación será superior al 35% en 6h, 55% en 8h y 75 % en 12h.

1.6. Justificación

La justificación del presente estudio radica en la gran importancia que tiene el recurso suelo, tanto en el equilibrio de los ecosistemas presentes, como en el desarrollo de los seres vivos, así mismo en el desarrollo de la economía del país. El suelo nos provee aproximadamente del 70% de alimentos que consumimos, para ello es necesario un suelo saludable, libre de contaminantes, entre ellos los metales pesados, que tienen como principal característica la bioacumulación en las especies que los consumen de manera directa o indirecta, causando problemas en el desarrollo de los seres vivos. Si el suelo esta saludable produce cultivos sanos, que nutren a los animales, plantas y las personas. Sin embargo, la degradación de este recurso es preocupante, mediante diversas actividades antropogénicas entre ellas la minería, han afectado significativamente muchas zonas del departamento de la Libertad, entre ellas el distrito de Sayapullo. Por ello se estudió un método de inertización de suelo para impedir la lixiviación de contaminantes como los metales pesados y de esta manera obtener un suelo limpio, sin contaminantes, donde se puede añadir nutrientes como abono y ser utilizado para la agricultura nuevamente.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Tipo de estudio

La presente investigación llevada a cabo es de tipo explicativa. Es por medio de leyes científicas que en este tipo de estudio se busca mostrar la realidad o comprenderla a base de dichas leyes, éstas en su conjunto permiten formar un sistema que explica la realidad. Basándose en los porqués de los sucesos que afectan a la vida social, respondiendo así a preguntas tales como: ¿Qué efecto...?; ¿Qué variables...?, ¿Por qué...?, etc. (Ramos,2020). De igual forma el alcance es de tipo experimental, esto porque busca la aplicación de los conocimientos que han sido adquiridos, de esta forma busca la resolución de problemas o la mejora de una situación o entorno. Por medio del manejo de una o más variables, en un acondicionamiento con una alta rigurosidad en sus procedimientos, buscando entender el por qué se producen los sucesos o como estos suceden y su efecto. Todo esto bajo el manejo del experimentador o los experimentadores y su manejo sobre las variables. (Alvares,2020). Así mismo presenta un enfoque de tipo transversal, esto dado a que presenta un tiempo de duración corto, es en dicho tiempo donde sucede la recolección de los datos y la manipulación de las variables para la correcta realización de la investigación presentada. (Fernandez y Baptista, 2014).

2.2 Población, muestra y muestro

2.2.1 Población

La población constituye todos los terrenos agrícolas ubicados en el área de influencia de la minería informal en el distrito de Sayapullo, provincia de Gran Chimú, departamento de la Libertad, con un área total de 23 600 hectáreas y una altitud de 2384 m.s.n.m. Cuyas coordenadas geográficas son -7.59556 de latitud, -78.4658 de longitud y 7° 35' 44" Sur, 78° 27' 57" Oeste respectivamente.

Figura 1

Mapa del distrito de Sayapullo – provincia de Gran Chimú



* Los puntos azules evidencian la minería informal presente en el distrito de Sayapullo

2.2.2 Muestra

Se tomaron 4 muestras del área aproximada de 0.5 hectáreas de potencial interés, contaminada por la minería ilegal en el distrito de Sayapullo, provincia de Gran Chimú, departamento de la Libertad, el día 26 de abril del 2024, a las 12 am, datos registrados en la cadena de custodia.

Tabla 1

Puntos de muestreo

Puntos de muestreo	Coordenadas UTM Zona 17 – WGS 84	
	E	N
P1	778393.00 m E	9159946.00 m S
P2	778408.00 m E	9159979.00 m S
P3	778394.00 m E	9159966.00 m S
P4	778405.00 m E	9159959.00 m S

Figura 2

Puntos de muestreo - Sayapullo

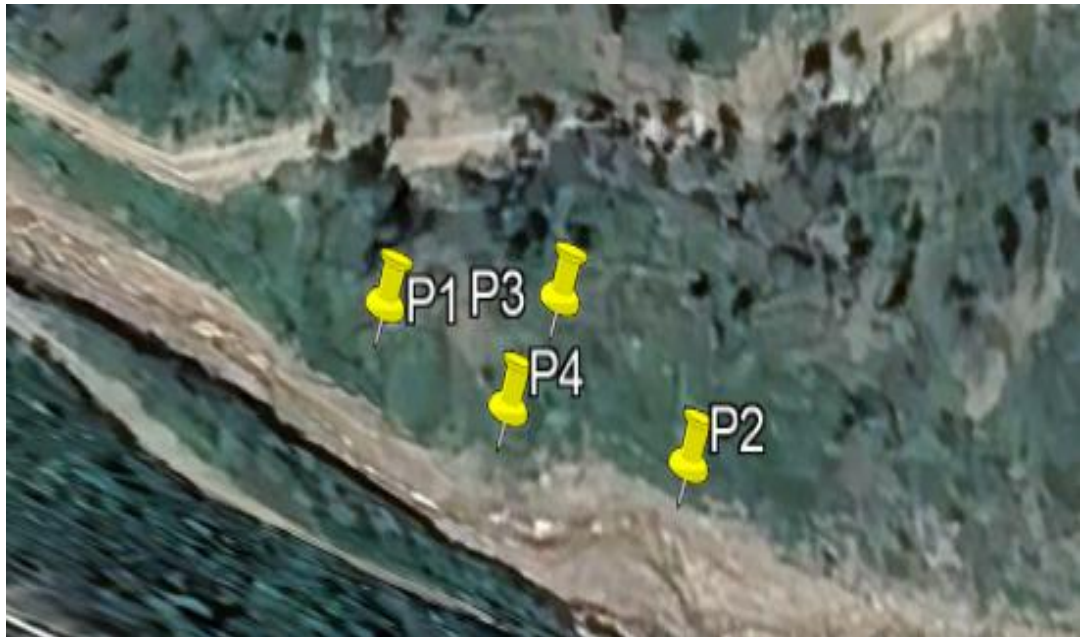


Figura 3

Zona de muestreo



2.2.3 Muestreo

La presente investigación se realizó mediante el muestreo de identificación en el área de potencial interés, que tiene por objetivo analizar la existencia de contaminación del suelo, según muestras representativas. Teniendo en cuenta la Guía para el muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente, MINAM 2014.

2.3 Técnicas e instrumentos

2.3.1 Técnicas

Se empleó la técnica de observación, mediante la cual se pudo evidenciar el deterioro del suelo en el área de interés contaminado por la minería ilegal, observando de esta manera los cambios físicos que presenta. La técnica de la observación consiste en llevar a cabo un registro tanto de conductas, comportamiento o sucesos, de manera confiable y válido. En este proceso la persona capta un momento externo o interno, esto permite el desarrollo de muchos procesos de contemplación, reflexión, de investigación; esto por medio de los acontecimientos visualizados (Matos y Pasek, 2008). Se tuvo en cuenta las técnicas para muestras superficiales según la Guía de Muestreo de Suelos del MINAM. Adicional a ello se recolectó las muestras correspondientes para su posterior análisis en el Laboratorio de la Universidad Privada del Norte.

2.3.2 Instrumentos

- Ficha de muestreo, para anotar la información levantada en campo.
- Ficha de recolección de datos.

2.4 Materiales e instrumentos

2.4.1 Materiales

Materiales de Gabinete

- Libreta de campo
- Celulares
- Programas de Microsoft Office
- Lapiceros

- Celular
- Programa de Google Earth
- Impresora
- Laptop
- Calculadora
- GPS

Materiales para la toma de muestra

- Guantes
- Zapatos de seguridad
- Bolsas de polietileno
- Mascarilla
- Cooler
- Lapicero
- Palana
- Picota
- Guardapolvo

Materiales de laboratorio

- EPP (guantes, lentes, mascarilla y guardapolvo)
- Vasos de precipitación de 100 ml y 500 ml
- Probeta de 50 ml
- Tamices
- Matraz vidrio 500 ml
- Tamiz 2.0 mm
- Bureta 20 ml
- Mortero de porcelana
- Luna de reloj
- Varilla de agitación
- Fiolas de vidrio de 50 ml
- Pissetas
- Mortero

- Pílon
- Papel filtro
- Matraces de Erlenmeyer de 100 ml y 500 ml

Reactivos químicos

- Ácido Nítrico (HNO₃)

2.4.2 Equipos

- pHmetro
- Agitador magnético
- Equipo multiparámetro
- Equipo de filtración al vacío
- Horno
- Balanza analítica
- Espectrofotómetro de llama

2.4.3 Procedimiento

- Recolección de la muestra

Se utilizaron 4 bolsas de polietileno, esterilizadas y transparentes, de 1 Kg cada una, para recolectar el suelo contaminado de Sayapullo. Luego se procedió a etiquetarlas y llenar la ficha de muestreo y cadena de custodia, posteriormente las muestras se colocaron en un cooler, junto ice pack para mantener la temperatura adecuada durante su traslado a Trujillo, donde se analizaron.

El muestreo se realizó de acuerdo a la Guía de Muestras de Suelos del MINAM.

- Caracterización de la muestra

La caracterización de la muestra se llevó a cabo teniendo como guía la Marcha EPA 3050- MÉTODO 3050 DIGESTIÓN ÁCIDA DE SEDIMENTOS, LODOS Y SUELOS. La cual se recomienda dentro del ECA 2017 para suelos y los metales a tratar. Para llevar a cabo la recolección de la muestra y su posterior tratamiento esta será tomada de 40 cm de profundidad, con la aplicación del método aleatorio, según lo expuesto en la guía del MINAM para el muestro de suelos; fijando como punto para la toma de la muestra un suelo agrícola con una contaminación minera mayor

a los 10 años, estas muestras fueron recolectadas en bolsas de plástico apropiadas y cerradas de una manera hermética, dichas muestras pasarán por un proceso de digestión antes del análisis de la misma, de esta manera obteniendo una muestra apta para su análisis, para el proceso de la digestión se requería una muestra con un peso de 0.5 g y agregar 50 ml de agua destilada y diluir rigurosamente la muestra, posteriormente añadir 5 ml de ácido nítrico (HNO₃); una vez terminado la muestra se realizará la digestión en microondas, con una potencia equivalente a los 1600 W, una rampa de 5 minutos, una presión de 350 psi, una temperatura de 175° y un intervalo de 5 minutos (un tiempo estimado entre 25 a 30 minutos), posterior a la finalización de la digestión se procede a filtrar en papel Whatman grado 42, utilizando la bomba al vacío, cambiando el papel filtro según es requerido, para finalizar se afora con 50 ml de agua desionizada en una fiola y su posterior refrigeración a temperatura ambiente.

- Proceso de vitrificación

Mediante la correcta aplicación de la vitrificación se logra tratar no solo suelos contaminados con residuos que representan un peligro para el medio ambiente, así como la salud humana, esto por medio de un tratamiento a altas temperaturas, proceso por el cual el suelo es fundido y se crea un vidrio el cual presenta una total estabilidad. Estos vidrios presentan una elevada resistencia química y logran inmovilizar a los contaminantes alejándolos del medio ambiente y el impacto que estos causan en él. (Arisqueta et al., 2021). El proceso de vitrificación ex – situ presenta una menor complejidad, un menor costo y es mucho más práctica para llevarla a cabo. Una vez finalizado el análisis inicial del suelo, se procede pasar el suelo contaminado por diversas mallas, para quitar de este todas las piedras y materiales de un tamaño no óptimo, de esta manera se obtiene un suelo limpio y apto para ser vitrificado. Se toma tres cantidades iguales de suelo contaminado (M1, M2 y M3), cantidades equivalentes a 15 g, estas muestras de suelo serán vitrificadas a tres tiempos diferentes; luego se procede a separar las muestras y ubicarlas en tres diferentes bandejas para proceder a ingresarlas en el horno y dar inicio con el proceso de vitrificación siendo 6h, 8h y 12 h respectivamente, estas muestras serán vitrificadas a una temperatura de 900 °C y retiradas según el tiempo señalado. Los resultados obtenidos en los diferentes tiempos (6h, 8h y 12h) serán evaluados por

medio de análisis estadísticos para determinar el impacto del tiempo sobre el proceso de vitrificación y su influencia. Esto será por medio de los siguientes análisis, una prueba de validación de hipótesis, media, desviación estándar, media de error estándar, correlación existente entre las variables (dependiente e independiente), resumen del modelo de la variable ANOVA (prueba Fisher), regresión lineal y diagrama de dispersión, esto para cada uno de los tiempos y sus resultados.

Figura 4:

Diagrama de flujo



2.5 Aspectos éticos

En la realización de la presente investigación se cumple con los aspectos éticos planteados en el código de ética para la investigación científica que presenta la Universidad Privada del Norte, como los son los principios éticos de: Humanidad, Justicia, Igualdad, Veracidad y Trabajo en Equipo. Esta investigación sustenta su elaboración en la veracidad de los datos

presentados en la misma, datos obtenidos siguiendo una correcta metodología de búsqueda de la información y el análisis de los datos obtenido mediante la observación, y la búsqueda de información mediante documentos como fuente de referencia, respetando la autenticidad y rechazando cualquier tipo de plagio de la información analizada en las diversas fuentes de referencia.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 Eficiencia del tiempo en la concentración de los metales pesados

Físicamente el suelo presentó un color marrón pálido, con pequeños tonos rojizos, así mismo presentó textura agrietada, no había presencia de organismos vivos. La humedad era prácticamente nula.

Adicional a ello se evaluaron las características fisicoquímicas:

Tabla 2:

Parámetros fisicoquímicos del suelo

Parámetros	Valores
pH	2.03
Conductividad	7.72 $\mu\text{S} / \text{cm}$

El pH promedio que indica el ECA para su categoría, tiene que estar entre 6.5 – 8.5, y en este caso es de 2.03, de igual manera no presenta una elevada conductividad, teniendo una conductividad que solo presenta 7.72 $\mu\text{S} / \text{cm}$

Tabla 3:

Prueba control (concentración inicial)

		Concentración inicial de la muestra
Muestra	Pb	500 mg/kg
	Cd	16.936mg/Kg
	Fe	436.051 mg/Kg

Los valores de los metales pesados en la muestra recolectada son comparados respecto al ECA, el Pb sobrepasa de manera abrupta los niveles respecto al ECA, las concentraciones de Cd encontradas sobre pasan el ECA aproximadamente por unas 16 veces, esto presentan un riesgo para la salud. El Fe se ubica como el segundo con los niveles más elevados. Estos hacen que la tierra se encuentre en un pésimo estado tanto físico como químico.

Tabla 4:

Concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)

Muestras	Concentración final (mg/kg)		
	Plomo	Cadmio	Hierro
M1	239.166	0.900	198.001
M2	206.150	0.523	194.460
M3	147.952	0.220	175.375

Recolección de conjunto de datos de la concentración final de los diferentes tiempos (6h, 8h y 12h) y muestras de tierra vitrificada, la concentración final obtenida después de cada tiempo con respecto a la concentración inicial, obteniendo la menor concentración en 12h, para Pb (500 a 147.952), para Cd (16.937 a 0.220) y Fe (436.051 a 175.375).

Tabla 5:

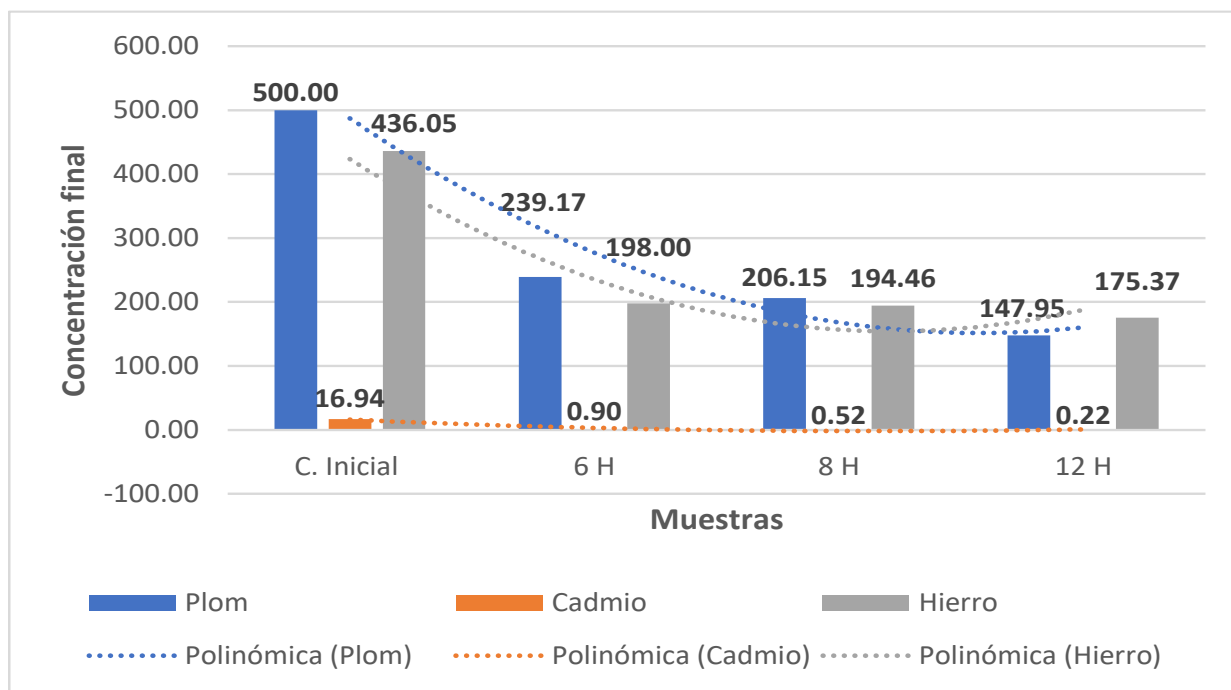
Análisis estadístico de la concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)

Varianza	9893.030
D. Estándar	99.464
C. De Variación	0.770

El conjunto de resultados obtenido de la concentración final de los diferentes tiempos (6h, 8h y 12h) y muestras de tierra vitrificada, tras un análisis estadístico presentan una varianza del 9893.030, Desviación estándar de 99.464 y una contante de variación de 0.770.

Figura 5:

Gráfico estadístico de la concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)



La concentración final de cada uno de los metales (Pb, Cd y Fe) vitrificados disminuyó, según el tiempo de la vitrificación (6h, 8h y 12h), siendo Cd con una mayor diferencia entre la concentración final y la inicial (16.936 a 0.220), seguido por el Fe (436.051 a 175.375) y una menor diferencia en el Pb (500 a 147.952), todos ellos el tiempo de vitrificación de 12 horas.

Tabla 6:

Porcentaje de remoción final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)

Muestras	Remoción final (%)		
	Plomo	Cadmio	Hierro
M1	52.17	94.68	54.49
M2	58.77	96.91	55.40
M3	70.41	98.70	59.78

Recolección de conjunto de datos del porcentaje final de remoción los diferentes tiempos (6h, 8h y 12h) y muestras de tierra vitrificada, el porcentaje final de remoción obtenido después de cada tiempo es determinado con respecto a la concentración final y la

concentración inicial, obteniendo que el mayor porcentaje de remoción se presenta en 12h, para Pb (70.41%), para Cd (98.70%) y Fe (59.78%).

Tabla 7:

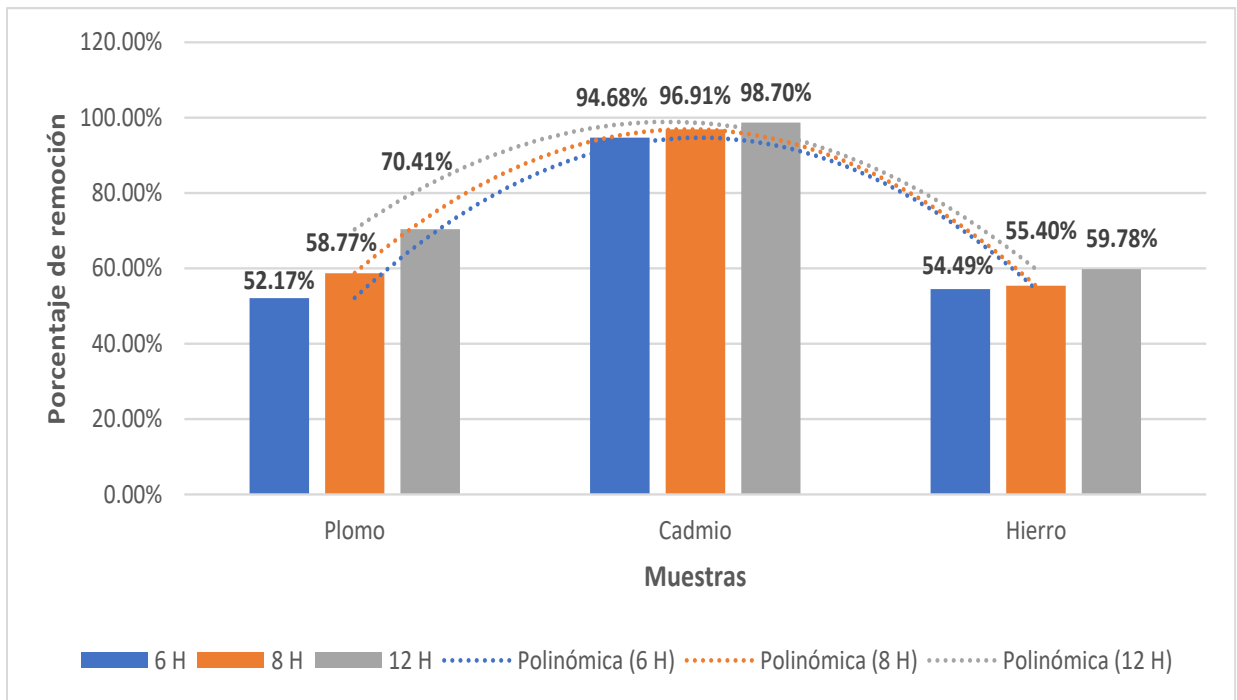
Análisis del porcentaje de remoción final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)

Varianza	0.039
D. Estándar	0.198
C. De Variación	0.278

El conjunto de resultados obtenido de porcentaje de remoción final de los diferentes tiempos (6h, 8h y 12h) y muestras de tierra vitrificada, tras un análisis estadístico presentan una varianza del 0.039, Desviación estándar de 0.198 y una contante de variación de 0.278.

Figura 6:

Gráfico estadístico de porcentaje de remoción final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)



El porcentaje final de remoción para cada uno de los metales (Pb, Cd y Fe) presentó porcentajes elevados, según el tiempo de la vitrificación (6h, 8h y 12h), siendo Cd con un mayor porcentaje final de remoción (99.70%), seguido por el Fe (59.78%) y un menor porcentaje final de remoción se encuentra el Pb (70.41%), todos ellos el tiempo de vitrificación de 12 horas.

3.2 Eficiencia del tiempo de acuerdo al proceso de vitrificación

Tabla 8:

Vitrificación del plomo mediante el tiempo

	Tiempo (h)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Remoción (%)
1	6	500	239.166	52.17%
2	8	500	206.150	58.77%
3	12	500	147.951	70.41%

Comparativa de los periodos de tiempo vitrificación (6h,8h y 12h) en el Pb, con respecto de su concentración inicial (500) a sus concentraciones finales (239.166, 210.447, 206.172) y su equivalencia en porcentajes de reducción (52.17%, 57.91% y 58.77%).

Tabla 9:

Rango de inertización en la vitrificación de plomo (Pb)

Mínimo	Máximo	Rango
52.17%	70.41%	61.29%

Rango del porcentaje de vitrificación para Pb en los tiempos (6h,8h y 12h), con un porcentaje mínimo de 52.17%, un máximo de 70.41%, y un rango promedio de 61.29%.

Tabla 10:

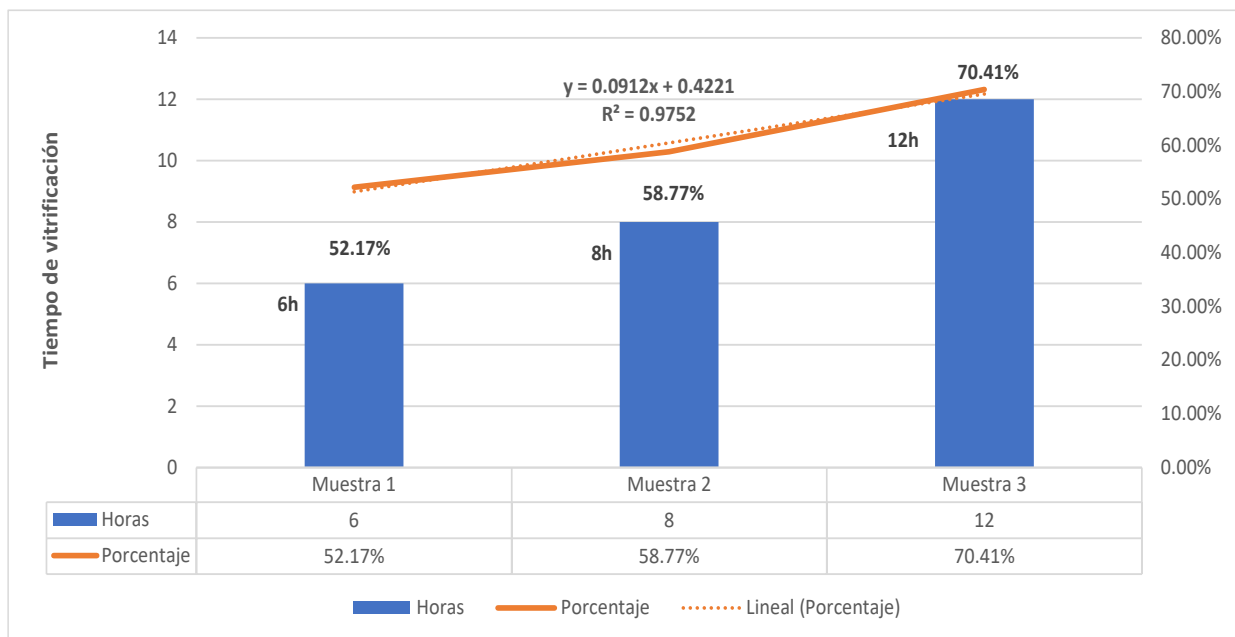
Análisis estadístico de la concentración final de Pb

Varianza	2132.843
D. Estandar	46.183
C. De Variación	0.234

El conjunto de resultados estadísticos obtenidos de la concentración final y muestras (M1, M2 y M3) para plomo, tras un análisis estadístico presentan una varianza del 2132.843, Desviación estándar de 46.183 y una contante de variación de 0.234.

Figura 7:

Porcentaje de remoción de Pb respecto a la concentración inicial



El porcentaje de reducción de Plomo (Pb) aumenta proporcionalmente al tiempo de vitrificación, de igual forma tiene los porcentajes de reducción más bajos en cada tiempo (6 h, 6h y 10 h) y presenta un porcentaje superior al 70% en 12 horas y presenta un rango de remoción de la vitrificación de 61.29%.

Tabla 11:

Vitrificación del cadmio mediante el tiempo

	Tiempo (h)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Remoción (%)
1	6	16.936	0.900	94.68%
2	8	16.936	0.523	96.91%
3	12	16.936	0.220	98.70%

Comparativa de los periodos de tiempo vitrificación (6h, 8h y 12h) en el Cd, con respecto de su concentración inicial (16.936) a sus concentraciones finales (0.900, 0.523 y 0.220) y su equivalencia en porcentajes de reducción (94.68%, 96.91% y 98.70%).

Tabla 12:

Rango de inertización en la vitrificación del cadmio (Cd)

Mínimo	Máximo	Rango
94.68%	98.70%	96.69%

Rango del porcentaje de vitrificación para Cd en los tiempos (6h,8h y 12h), con un porcentaje mínimo de 94.68%, un máximo de 98.70%, y un rango promedio de 96.69%.

Tabla 13:

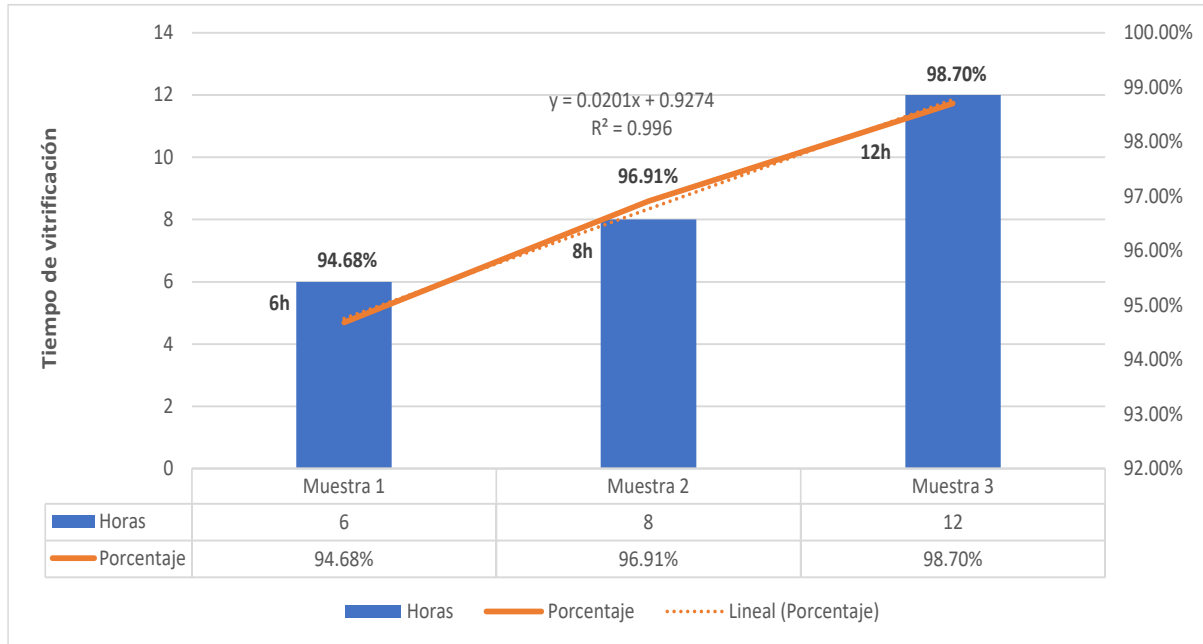
Análisis estadístico de la concentración final de Cd

Varianza	0.116
D. Estandar	0.341
C. De Variación	0.622

El conjunto de resultados estadísticos obtenidos de la concentración final y muestras (M1, M2 y M3) para cadmio, tras un análisis estadístico presentan una varianza del 0.116, Desviación estándar de 0.341 y una contante de variación de 0.622.

Figura 8:

Porcentaje de remoción de Cd respecto a la concentración inicial



El porcentaje de reducción de Cadmio (Cd) denota un contraste poco notorio entre la vitrificación de 6 h, 8h y 12 h, siendo una vitrificación sumamente óptima, muy cercana al 100% en todos los tiempos y llegando a ser muy cercano al 100% en 12 h (98.70 %) y presenta un rango de remoción de la vitrificación de 96.69%.

Tabla 14:

Vitrificación del hierro mediante el tiempo

	Tiempo (h)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Inertización (%)
1	6	436.051	198.001	54.49%
2	8	436.051	194.460	55.40%
3	12	436.051	175.375	59.78%

Comparativa de los periodos de tiempo vitrificación (6h,8h y 12h) en el Fe, con respecto de su concentración inicial (436.051) a sus concentraciones finales (198.001, 194.460 y 175.375) y su equivalencia en porcentajes de reducción (54.49%, 55.40% y 59.78%).

Tabla 15:

Rango de inertización en la vitrificación del hierro (Fe)

Mínimo	Máximo	Rango
54.49%	59.78%	57.135 %

Rango del porcentaje de vitrificación para Fe en los tiempos (6h,8h y 12h), con un porcentaje mínimo de 54.49%, un máximo de 59.78%, y un rango promedio de 57.135 %.

Tabla 16:

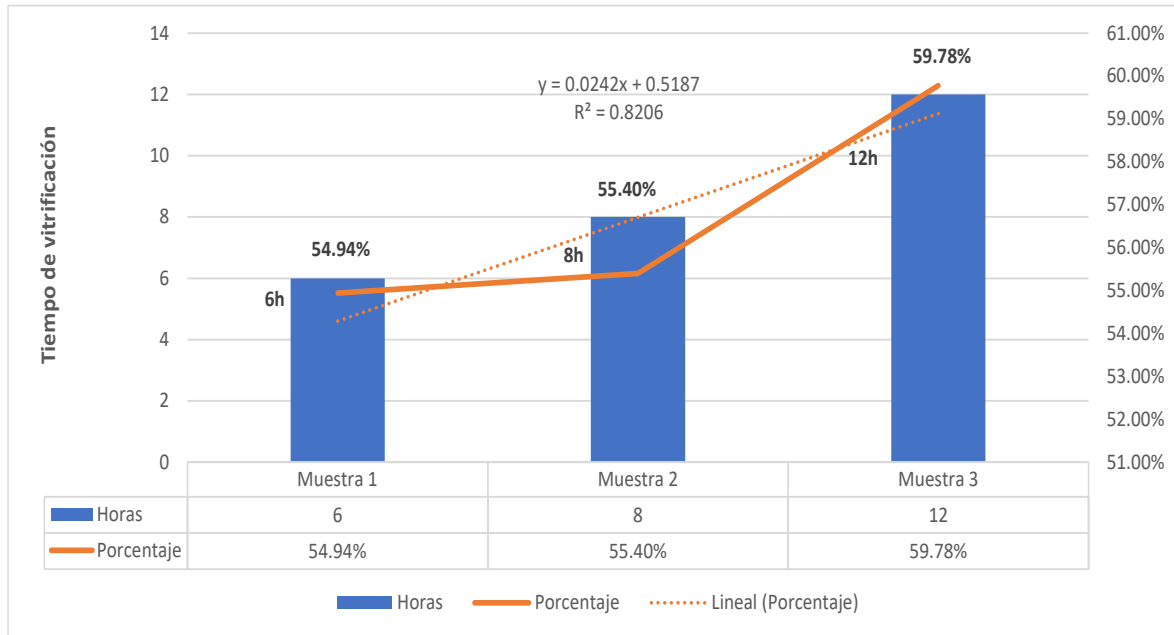
Análisis estadístico de la concentración final de Fe

Varianza	148.122
D. Estandar	12.171
C. De Variación	0.064

El conjunto de resultados estadísticos obtenidos de la concentración final y muestras (M1, M2 y M3) para hierro, tras un análisis estadístico presentan una varianza del 148.122, Desviación estándar de 12.122 y una contante de variación de 0.064.

Figura 9

Porcentaje de remoción de Fe respecto a la concentración inicial



El porcentaje de reducción de Hierro (Fe) presenta un porcentaje de reducción similar entre los tiempos de 6h y 8h (54.49% y 55.40% respectivamente) y presentando una mayor diferencia para el tiempo de 12 h (59.78%) siendo cercana al 60% y presenta un rango de remoción de la vitrificación de 57.135 %.

Figura 10:

Estadísticas para una muestra de 6h

Estadísticas para una muestra 6h

	N	Media	Desv. estándar	Media de error estándar
Vitrificación en 6h	3	67.1133	23.90160	13.79959

Media de los porcentajes de reducción de Pb, Cd y Fe (6h), desviación estándar y media de error estándar según el porcentaje de reducción de obtenido de cada metal.

Figura 11:

Prueba de validación de hipótesis para una muestra de 6h.

Prueba para una muestra 6h
Valor de prueba = 35.00

	t	gl	Significación		Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
			P de un factor	P de dos factores		Inferior	Superior
Vitrificación en 6h	2.327	2	.073	.145	32.11333	-27.2615	91.4882

El punto de un factor (0.073) se encuentra por encima del valor Alpha (0.05), dando por valida la hipótesis de porcentaje de reducción para una muestra de 6h.

Figura 12:

Estadísticas para una muestra de 8h.

Estadísticas para una muestra 8h

	N	Media	Desv. estándar	Media de error estándar
Vitrificación en 8h	3	70.3600	23.05463	13.31060

Media de los porcentajes de reducción de Pb, Cd y Fe (8h), desviación estándar y media de error estándar según el porcentaje de reducción de obtenido de cada metal.

Figura 13:

Prueba de validación de hipótesis para una muestra de 8h.

Prueba para una muestra 8h
Valor de prueba = 55.00

	t	gl	Significación		Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
			P de un factor	P de dos factores		Inferior	Superior
Vitrificación en 8h	1.154	2	.184	.368	15.36000	-41.9109	72.6309

El punto de un factor (0.184) se encuentra por encima del valor Alpha (0.05), dando por valida la hipótesis de porcentaje de reducción para una muestra de 8h.

Figura 14:

Estadísticas para una muestra de 12h

Estadísticas para una muestra 12h

	N	Media	Desv. estándar	Media de error estándar
Vitrificación en 12h	3	76.2967	20.11669	11.61438

Media de los porcentajes de reducción de Pb, Cd y Fe (12h), desviación estándar y media de error estándar según el porcentaje de reducción de obtenido de cada metal.

Figura 15:

Prueba de validación de hipótesis para una muestra de 12h.

Prueba para una muestra 12h

Valor de prueba = 75.00

	t	gl	Significación		Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
			P de un factor	P de dos factores		Inferior	Superior
Vitrificación en 12h	.112	2	.461	.921	1.29667	-48.6760	51.2693

El punto de un factor (0.461) se encuentra por encima del valor Alpha (0.05), dando por valida la hipótesis de porcentaje de reducción para una muestra de 12h.

Figura 16:

Correlaciones entre concentración inicial de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y concentración final en Tiempo de vitrificación (6h).

Correlaciones

		Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Concentración final en tiempo de 6h
Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Correlación de Pearson	1	.999*
	Sig. (bilateral)		.026
	N	3	3
Concentración final en tiempo de 6h	Correlación de Pearson	.999*	1
	Sig. (bilateral)	.026	
	N	3	3

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

La correlación se presenta en Correlación Bilateral Pearson y presenta una alta correlación siendo 0.999, en contaminación por Pb, Cd y Fe y vitrificación en 6h, de igual forma presenta una correlación significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Figura 17:

Correlaciones entre concentración inicial de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y concentración final en Tiempo de vitrificación (8h).

Correlaciones

		Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Concentración final en tiempo de 8h
Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Correlación de Pearson	1	.997*
	Sig. (bilateral)		.046
	N	3	3
Concentración final en tiempo de 8h	Correlación de Pearson	.997*	1
	Sig. (bilateral)	.046	
	N	3	3

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

La correlación se presenta en Correlación Bilateral Pearson y presenta una alta correlación siendo 0.997, en contaminación por Pb, Cd y Fe y vitrificación en 8h, de igual forma presenta una correlación significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Figura 18:

Correlaciones entre concentración inicial de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y concentración final en Tiempo de vitrificación (12h).

Correlaciones

		Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Concentración final en tiempo de 12h
Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Correlación de Pearson	1	.964
	Sig. (bilateral)		.171
	N	3	3
Concentración final en tiempo de 12h	Correlación de Pearson	.964	1
	Sig. (bilateral)	.171	
	N	3	3

La correlación se presenta en Correlación Bilateral Pearson y presenta una alta correlación siendo 0.964 en contaminación por Pb, Cd y Fe y vitrificación en 12h.

Figura 19:

Correlaciones entre concentración inicial de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y concentración final en Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h).

Correlaciones

		Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Concentración final en tiempo de 6h, 8h y 12h
Concentración inicial de Pb, Cd y Fe	Correlación de Pearson	1	.967**
	Sig. (bilateral)		<.001
	N	9	9
Concentración final en tiempo de 6h, 8h y 12h	Correlación de Pearson	.967**	1
	Sig. (bilateral)	<.001	
	N	9	9

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

La correlación se presenta en Correlación Bilateral Pearson y presenta una alta correlación siendo 0.967, teniendo una correlación significativa en el nivel 0,01 (bilateral) correlaciones entre concentración inicial de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe y concentración final en Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h).

Figura 20:

Resumen del modelo de la variable para Pb.

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.999 ^a	.999	.998	2.0937246

a. Predictores: (Constante), Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)

Presenta una alta relación entre las variables (0.999), de igual forma se muestra que el 99.9% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente.

Figura 21:

ANOVA^a.

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4261.302	1	4261.302	972.083	.020 ^b
	Residuo	4.384	1	4.384		
	Total	4265.686	2			

a. Variable dependiente: Inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb

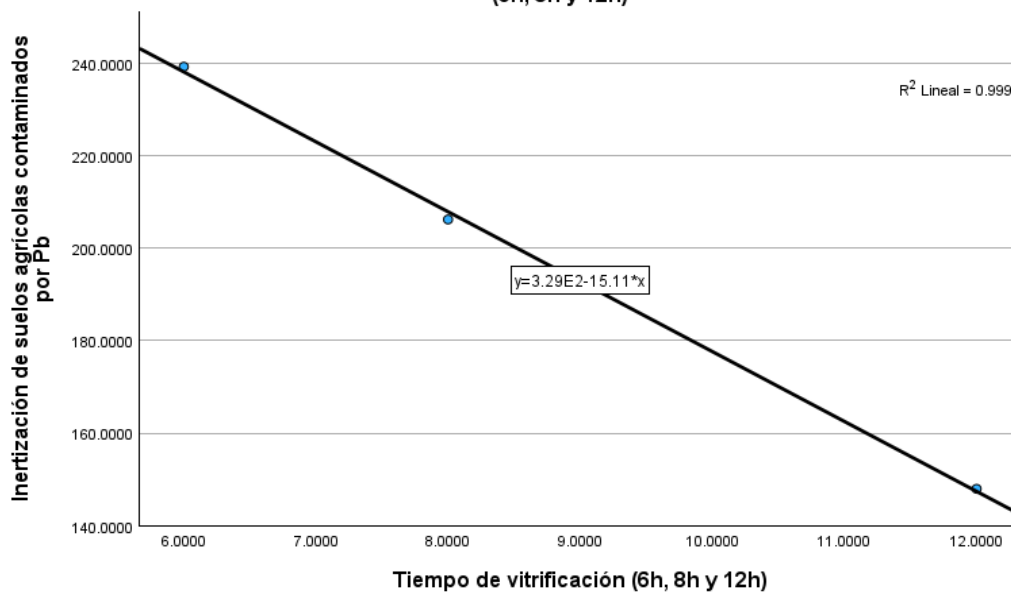
b. Predictores: (Constante), Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)

Por medio de la prueba de Fisher se determina que la influencia entre las variables es significativa, siendo un valor de significancia de 0.020, dando por valido al coeficiente.

Figura 22:

Regresión lineal para Pb.

Diagrama de dispersión de Inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb por Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)



Por medio de un análisis estadístico se obtiene la regresión lineal de los datos obtenidos de los resultados, mostrando en el diagrama de dispersión en base al tiempo de vitrificación (6h,8h y 12h) con respecto a la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb inicial y final (M1, M2 y M3) según la tendencia de los mismos, en base a la ecuación de la regresión ($y=3.29E2-15.11 * x$) y el valor lineal (R^2) cuyo valor es 0.999.

Figura 23:

Resumen del modelo de la variable para Cd.

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.968 ^a	.937	.875	.1205348

a. Predictores: (Constante), Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)

Presenta una alta relación entre las variables (0.968), de igual forma se muestra que el 93.7% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente.

Figura 23:

ANOVA^a.

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	.218	1	.218	14.976	.161 ^b
	Residuo	.015	1	.015		
	Total	.232	2			

a. Variable dependiente: Inertización de suelos agrícolas contaminados por Cd

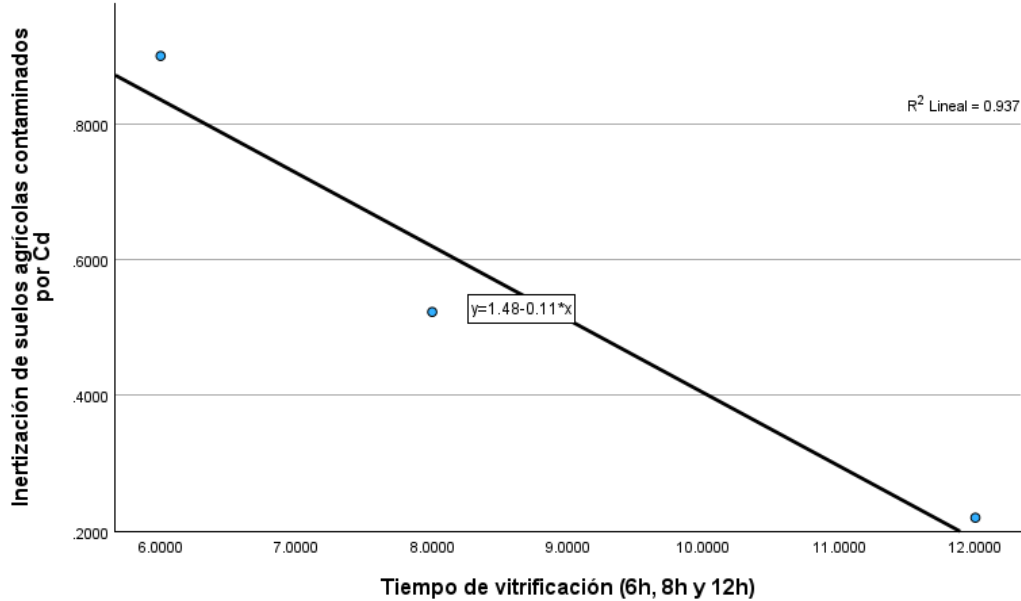
b. Predictores: (Constante), Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)

Por medio de la prueba de Fisher se determina que la influencia entre las variables es significativa, siendo un valor de significancia de 0.161, dando por valido al coeficiente.

Figura 24:

Regresión lineal para Cd.

Diagrama de dispersión de Inertización de suelos agrícolas contaminados por Cd por Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)



Por medio de un análisis estadístico se obtiene la regresión lineal de los datos obtenidos de los resultados, mostrando en el diagrama de dispersión en base al tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h) con respecto a la inertización de suelos agrícolas contaminados por Cd inicial y final (M1, M2 y M3) según la tendencia de los mismos, en base a la ecuación de la regresión ($y=1.48-0.11 \cdot x$) y el valor lineal (R^2) cuyo valor es 0.937.

Figura 25:

Resumen del modelo de la variable para Fe.

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.982 ^a	.965	.931	3.2079367

a. Predictores: (Constante), Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)

Presenta una alta relación entre las variables (0.968), de igual forma se muestra que el 96.5% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente.

Figura 26:

ANOVA^a.

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	285.946	1	285.946	27.786	.119 ^b
	Residuo	10.291	1	10.291		
	Total	296.237	2			

a. Variable dependiente: Inertización de suelos agrícolas contaminados por Fe

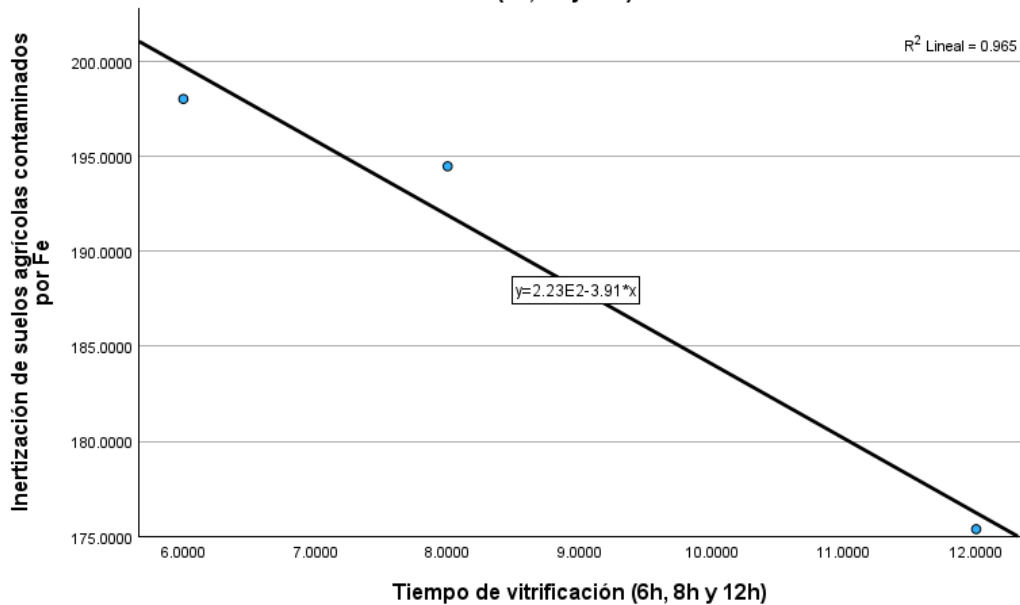
b. Predictores: (Constante), Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)

Por medio de la prueba de Fisher se determina que la influencia entre las variables es significativa, siendo un valor de significancia de 0.119, dando por valido al coeficiente.

Figura 24:

Regresión lineal para Fe.

Diagrama de dispersión de Inertización de suelos agrícolas contaminados por Fe por Tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h)



Por medio de un análisis estadístico se obtiene la regresión lineal de los datos obtenidos de los resultados, mostrando en el diagrama de dispersión en base al tiempo de vitrificación (6h,8h y 12h) con respecto a la inertización de suelos agrícolas contaminados por Fe inicial y final (M1, M2 y M3) según la tendencia de los mismos, en base a la ecuación de la regresión ($y=2.23E2-3.91*x$) y el valor lineal (R^2) cuyo valor es 0.965.

3.3 Costo del proceso de vitrificación

El proceso de vitrificación como todo proceso representa un costo según la energía la cual está utilizando y el equipo usado, la energía usada en este caso es energía eléctrica la cual se mide en Kw, en este caso para la ciudad de Trujillo el precio del Kw es de S/ 0,782 por Kw consumido, para este proceso el equipo usado es una muffle modelo (Muffle furnace F0110CR), la cual tiene un consumo de 1 Kw/h de uso, la cantidad de suelo vitrificado, contaminado por Pb, Cd y Fe fue una muestra de 15 g, siendo tres muestras M1 (6h), M2 (8h) y M3 (12).

Tabla 17:

Costos del proceso de vitrificación.

Muestra	Costo 15 g	Costo 1kg	Costo 1000 kg
M1	4.692	312.8	312800
M2	6.256	417.1	417066.7
M3	9.384	625.6	625600

El costo de un proceso de vitrificación efectivo en 15 gramos de muestra es de S/ 4.692, S/ 6.256 y S/ 9.384 para los tiempos de 6h, 8h y 12h respectivamente, para la vitrificación de una muestra de 1Kg el costo es de S/ 312.8 (6h), S/ 417.1 (8h) y S/ 625.6 (12h) y para la vitrificación de una muestra de 1000 Kg el costo por hora sería de S/ 312,800, S/ 417,066.7 y S/ 625,600 para 6h, 8h y 12h respectivamente.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 El tiempo en la vitrificación de metales pesados

Nuestra investigación mostró resultados favorables respecto al objetivo de evaluar la influencia del tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por metales pesados. En la presente investigación se redujo hasta 70.41 % de Pb, 98.70 % de Cd y 59.78 % de Fe, muestras que fueron sometidas durante el tiempo máximo de 12 horas. En los otros tiempos evaluados, de 6 y 8 horas, los resultados para Pb son de 52.17 % y 58.77 %, Cd de 94.68 % a 96.91 % y Fe de 54.49 % a 55.40 % de inertización respectivamente. Estos resultados se dieron debido a que la principal ventaja del proceso de vitrificación es que produce un material vítreo. (Esquina y Calles 2018) producto amorfo, que posee rápida ordenación de moléculas para tener posiciones definidas, caracterizándose por presentar un aspecto sólido con dureza y rigidez, que posee gran estabilidad química, incorporando así de forma homogénea los metales pesados. (Saenz, 2006), creando así una relación directa entre el tiempo y el proceso de vitrificación de contaminantes inorgánicos. (Kavouras y Kaimakamis 2003). En el estudio realizado por Aroni (2023) se encontró similitud con los resultados obtenidos, la autora evaluó dos tiempos, 1 y 5 horas, donde a mayor tiempo obtuvo mejores resultados respecto a la inertización del suelo estudiado, reduciendo así de 1500 mg/kg a 200 mg/kg de Pb, así mismo el As de 2000 mg/kg a 200 mg/kg, esto debido a que en altas temperaturas los enlaces del material vítreo se rompen y su estructura incorpora metales pesados. (Esquina y Calles 2018).

4.2 Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo durante el proceso de vitrificación

En el presente estudio, los parámetros evaluados en el suelo cambiaron drásticamente, tanto los parámetros físicos como los químicos, el suelo paso de tener un color marrón oscuro a un rojizo claro, con una pequeña capa de grumos, producto del proceso de vitrificación, el pH, pasó de ácido a menos ácido, con un pH inicial de 2.03 a 3.67, así mismo la concentración de metales pesados también redujo, pero no se eliminaron en su totalidad. Esto debido a que los metales pesados una vez depositados en el suelo tienen a permanecer y son altamente resistentes a la degradación inducida biológica o

químicamente. (Khalid y Shahid, 2017). Por ejemplo, el plomo, es difícil de reducir debido a que presenta un alto grado de persistencia en el suelo, de 150 a 5000 años. (Kavouras y otros, 2003). De igual forma, el Cd tiene una vida media biológica de 18 años aproximadamente. (Heliyon y otros, 2020). Así mismo el hierro es un metal persistente, pero es difícil encontrarlo en su estado puro.

La vitrificación es el proceso mediante el cual se busca remediar los suelos, sin embargo, algunas propiedades se ven afectadas, ya que la tierra es sometida a altas temperaturas constantes durante un tiempo determinado, algunos parámetros como la humedad, el contenido de materia orgánica e inorgánica se vuelven casi escasos (Trifunovic, 2021). Así mismo Arisqueta (2021), afirma que los parámetros químicos del suelo son muy diferentes después del proceso de vitrificación, obteniendo así un suelo nuevo prácticamente. Simbaña (2021) en su investigación, concluyó que el suelo queda inerte después del proceso de vitrificación, donde los valores de los parámetros físicoquímicos son casi inexistentes.

4.3 Tiempo óptimo para la correcta inertización del suelo contaminado

Uno de los objetivos planteados fue encontrar el tiempo óptimo para la correcta vitrificación e inertización del suelo contaminado por metales pesados. Según nuestros resultados, podemos afirmar que, a mayor tiempo de exposición a la temperatura, los metales pesados estudiados muestran mayor reducción. Siendo así el tiempo óptimo 12 horas, los cuales presenta reducciones de hasta un 70.41 % de Pb, 98.70 % de Cd y 59.78 % de Fe, a diferencia de los otros tiempos evaluados. Esto debido a que, según Cañadas, Martines y Rodríguez (2009) afirman que el tiempo adecuado para la vitrificación de suelos, oscila entre las 5 a 24 horas, dado que con el progresivo calentamiento durante el tiempo adecuado, la fusión del suelo produce la destrucción de los contaminantes orgánicos, la eliminación de los compuestos metálicos volátiles y semivolátiles, Dellisanti y Roddi (2008) mientras que al enfriarse la masa fundida da como producto final la formación de un vidrio que inmoviliza los contaminantes orgánicos, como los metales pesados. (Khalid y Shahid, 2017). Así mismo Aroni (2023) señala que el tiempo tiene una relación directa como el proceso estudiado. Por otra parte, García (2021) en su investigación, afirma lo mismo que los autores anteriormente mencionados, cuyo proceso fue de 18 horas, en las cuales logró reducir hasta el 92.78% de plomo.

1.7. 4.4 Costro aproximado del proceso de vitrificación

Se buscó estimar el costo aproximado del proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe. Según nuestros procesos los resultados indican que para vitrificar 15 gramos de cada muestra es de de S/ 4.692, S/ 6.256 y S/ 9.384 para los tiempos de 6h, 8h y 12h respectivamente y para una muestra de 1000 kg de suelo contaminando el costo sería de S/ 312,800 (6h), S/ 417,066.7 (8h) y S/ 625,600 (12h). Así mismo cabe recalcar que de acuerdo a la capacidad del horno mufla, las muestras se pueden meter en simultaneo, tomando en cuenta que el tiempo óptimo para la mayor reducción de metales pesados es de 12 horas. Estos costos se dan debido a que el proceso de vitrificación representa el costo según la energía eléctrica usada y el equipo para vitrificar, en la ciudad de Trujillo el precio del Kw es de S/ 0,782 por Kw consumido, para este proceso el equipo usado es una mufla modelo (Muffle furnace F0110CR), la cual tiene un consumo de 1 Kw/h de uso, a estos datos se le agrega el tiempo que requiere cada muestra para poder ser vitrificada. Khalid y Shahid (2016), afirman que existen diversas tecnologías disponibles para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, sin embargo, el costo de las mismas muchas veces es elevado. Khalid y Shahid (2017), agregan que la vitrificación no es considerada una técnica clásica para la remediación de metales, pero es comparativamente fácil de aplicar en comparación de otros métodos de remediación física, sin embargo, es un método muy costoso, debido a que requiere mucha energía para la fusión. (Aroni, 2023). Dorronsoro (2017) considera que la vitrificación es una técnica de remediación de suelos muy efectiva, pero el costo es muy elevado, aproximadamente entre 800 a 1000 dólares el metro cúbico, para vitrificación ex situs.

Limitaciones:

- El tiempo en el laboratorio de la Universidad Privada del Norte es limitado, por ello no se pueden realizar más ensayos, con el fin de encontrar diversas variaciones entre los resultados obtenidos.
- El proceso de vitrificación también se puede realizar por medio de electrodos, sin embargo, estos equipos no están disponibles en la universidad.

Conclusiones:

- El tiempo tiene un grado de influencia de 99.9% (Pb), 93.7% (Cd) y 96.5% (Fe); de igual forma en promedio el tiempo presenta una influencia del 98.3% para los tres metales, de esta manera incide significativamente en la inertización de suelos agrícolas contaminados por metales pesados, mediante el proceso de vitrificación, siendo sumamente cercana a 100%.
- La eficacia del proceso de vitrificación en la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe, varía de acuerdo al tiempo de exposición al tratamiento, teniendo una varianza de 9893.030 en concentraciones finales y una varianza de 0.039 en porcentajes de inertización, entre los resultados obtenidos en los diferentes tiempos evaluados.
- Se evidenció cambios drásticos en los parámetros evaluados después del proceso de vitrificación, como en el color, pasando de marrón oscuro a rojizo, contenido de materia orgánica, la cual se eliminó durante la vitrificación, pH, pasando de un pH ácido de 2.03 a un pH menos ácido de 3.67, así mismo la concentración de metales pesados disminuyó.
- El tiempo óptimo para la correcta inertización del suelo agrícola contaminado por metales pesados es de 12 horas, los cuales presenta reducciones de hasta un 70.41 % de Pb, 98.70% de Cd y 59.78 % de Fe, concluyendo de esta manera que el tiempo tiene una relación directa con el proceso estudiado.
- El costo estimado para el proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe, el costo sería de S/ 312,800, S/. 417,066.7 y S/ 625,600 (12h), para 6: 8 y 12 horas respectivamente.

REFERENCIAS

- Angeles, J., Angeles R., De la Cruz, L., Lavado, C. y López, G. (2023). Fitorremediación de plomo por tres especies vegetales con una enmienda orgánica, (1). <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.155>
- Aroni, M. (2023). Vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022. [Tesis de Título, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/35028>
- Cañadas, I., Martínez, D. y Rodríguez, J. (2009). Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de sierra almagra (Almería), 19, (114), 50-57. <http://hdl.handle.net/2117/6279>
- Antonopoulos, I., Comninou, D., Cucaracha, S., Hadjiantoniou, CP., Ioannidis, A., Kaimakamis, G., Karakostas, Th., Nouet, G., Pavlidou, E., Prakouras, A., Sofoniou, M. y Zoubulis, A. (2003). Vitrificación de cenizas sólidas ricas en plomo procedentes de la incineración de residuos industriales peligrosos. 23, 361-371. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00153-8)
- Ballesteros, S., Jordán, JJ., Rincón, B. y Rincon, J. (2019). Vitrificación de un residuo de cromato de sodio y propiedades mecánicas de una vitricerámica final, 4, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.mblux.2019.100025>
- Basegio, T., Beck, AP., Bergmann, Cp. y Bernardes, AM. (2009). Vitrificación: Una alternativa para minimizar el impacto ambiental causado por los residuos de la industria del cuero, 165, 603-611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.045>
- Bibi, I., Dumat, C., Khalid, S., Khan, N., Murtaza, B. y Shahid, M. (2017). Una comparación de tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, 182, 247-268. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>
- Bingsheng, L., Chen, X., Huang, W., Qi, Q., Shuai, Z., Shunzhang, C., Wenxiao, H., Xiaoqiang, W., Xirui, L. y Yaping, L. (2020). Vitrificación rápida de suelos contaminados con uranio: efecto y mecanismo, 263, 114539. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114539>

- Bolan, N., Danés, C., Hoang, S., Kirkham, MB., Kolivabandara, P., Lam, S., Liyanage, C., Long, H., Rinklebe, J., Sarkar, B., Seshadri, B., Visitante, V., Vithanage, M. y Wijesekara, H. (2021). Mitigación de suelos peligrosos contaminados con hidrocarburos de petróleo mediante enmiendas orgánicas: una revisión, 416, 125702. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125702>
- Calles, P., Esquina, Ma., Jordania, MM. Y Sánchez, PJ. (2018). Vitrificación y vitrocerámicas derivadas de residuos mineros que contienen vermiculita y fosfato de litio y aluminio, 227, 86-89. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.05.001>
- Canción, X., Ding, D., Lachance, J. y Wei, C. (Una revisión sobre la sostenibilidad del tratamiento térmico de suelos contaminados, 253, 449-463. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.118>
- Cañadas, I., Martínez, D. y Rodríguez, J. (2009). Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de sierra almagrera (Almería), 19, (114), 50-57. <http://hdl.handle.net/2117/6279>
- Cañadas, I., Cardellach, E., Navarro, Andrés. Y Rodríguez, J. (2013). Vitrificación solar térmica de suelos contaminados por minería, 119, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.002>
- Carrasco, I. y Picquart, M. (2017). De la temperatura y du medición, 11, (1). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6019786>
- Corredor, C. (2016). Revisión bibliográfica sobre ensayos de método de transferencia de calor al suelo de in situ. [Tesis de Título, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/flip/?pdf=https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/1e439d76-869e-43e1-89b8-2f3454dae534/content>
- Chatterjeeba, PK., Rujb, B. y Punčocháňa, M. (2012). Desarrollo de procesos para la eliminación de residuos plásticos mediante tecnologías de pirólisis por plasma y opción de valorización de energía, 42, 420-430. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.433>
- Chi, Y., Jian, Y., Sheng, L., Wang, Q, y Xiao L. (2010). Aplicación de plasma térmico para vitrificar cenizas volantes procedentes de incineradores de

- residuos sólidos municipales, 78, 626-630.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.035>
- Chrissafis, K., Karakostas, Th., Komninou, Ph., Pantazopoulou, E., Pavlidou, E., Vourlias, G. y Zouboulis, Ai. (2016). Vitrificación de lodos de curtiduría incinerados en matrices de silicato para estabilización con cromo.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.011>
- Decreto Supremo 011-2017-MINAM. Por el cual se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental para el suelo. 2 de noviembre de 2017.
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>
- Domínguez, A., Inguanzo, M., Menéndez, J y Pis, JJ. (2005). Secado, pirólisis y gacificación inducida por microondas (MWDPG) de lodos de depuradora: Vitrificación de residuos sólidos, 74, 406-412.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.013>
- Dorado, M., Ortiz, I., Sanz, J. y Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados, 6.
https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf
- Dorronsoro, C. (2014). Módulo suelos. [Tesis de Master, Universidad de Granada]. <https://www.slideserve.com/essien/master-en-ingenier-a-del-medio-ambiente-m-dulo-suelos>
- Echave, J. (2016). La minería ilegal en Perú, entre la informalidad y el delito, 263, (2), 131-144. <https://nuso.org/articulo/la-mineria-ilegal-en-peru-entre-la-informalidad-y-el-delito/>
- Elías, Y. (2019). Minería ilegal, conflicto armado y vulneración al medio ambiente, 2, (1). <http://www.infometrica.org/index.php/ssh/article/view/44>
- Escobar, O, Espín, D. y Jarrín, J. (2017). Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto Rio Blanco, 2, (4), 141-154. <https://doi.org/10.24133/rcsd.V2N4.2017.01>
- Fatta, D., Haralambous, K., Loizidou, M. y Moustakas, K. (Sistema de demostración de gasificación/vitrificación por plasmas para una eficacia tratamiento de

- residuos peligrosos, B123, 120-126.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.038>
- Francesco, D., Piermaria, L. y Giovanni, V. (2009). Remediación de materiales que contienen amianto mediante vitrificación por calentamiento Joule realizada en un aparato prepiloto, 91 (3-4), 61-67.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.12.001>
- Galán, E. y Romero, R. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados, 10, 48-60.
https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla10_48.pdf
- García, A. (2021). Aspectos hidrológicos de las técnicas de remediación de suelos contaminados por metales pesados. [Tesis de Maestría, Universidad de Alcalá]. <http://hdl.handle.net/10017/49385>
- García, L. (2009). Capacidad remediadora y bioacumuladora de los órganos de *Helianthus annuus* L. “girasol” cuando son sometidas a diferentes concentraciones de plomo. [Tesis de Maestría, Universidad Internacional de Trujillo]. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/4924>
- García, M., Martínez, S. y Nogués, J. (2010). La vitrificación un ejemplo de sostenibilidad ambiental, 18, (3), 321-328.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4043580>
- Gráfico-asa, C., Intaravucha, N., Kwanyun, P., Phutthimethakul, L., Praditwattana, N. y Supakata N. (2023). Características del material de enmienda del suelo procedente de residuos de alimentos desechados en bolsas de bioplástico, 9(2), 97. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020097>
- Gobierno del Perú. (2024). *¿Qué son los metales pesados?* Salud Ambiental y alimentaria. <https://www.gob.pe/47991-que-son-los-metales-pesados>
- Gobierno de México. Manual teórico-práctico Los Biofertilizantes y su uso en la Agricultura. 26 de agosto de 2015.
<https://www.gob.mx/agricultura/documentos/manual-teorico-practico-los-biofertilizantes-y-su-uso-en-la-agricultura>

- Gou, M. y Li, W., Liu, L. (2018). Técnicas de remediación de suelos contaminados con metales pesados: principios y aplicabilidad, 633, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Grozdanov, A., Kamusheva, A., Karamánov, A., Karamánov, E., Ljatif, E., Nac9evski, G., Paunovi, P. y Rangelov, B. (2017). Vitrificación de residuos peligrosos de Fe-Ni en vitrocerámica con estructura cristalina fina y elevadas características de explotación, 5, 432-441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.020>
- Jiménez, R. (2017). Introducción a la contaminación del suelo. Mundi-Prensa. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=iZg6DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Introducci%C3%B3n+a+la+contaminaci%C3%B3n+de+suelos&ots=i6IxUn1x0A&sig=kski_Sg9oQ4yIK0JP0Vgm-mgdWg#v=onepage&q&f=false
- Lull, C. y Roqueta, D. (2016). Estudio bibliográfico de los criterios base para la selección del método de recuperación de un suelo contaminado. [Tesis de Título, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/72603>
- Magdalena, Ma. Y Ruiz, T. (2017). Sobre la comprensión social del tiempo en la actualidad: una reflexión desde Norbert Elias, 19, (56), 141-163. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305026636006>
- Marín, G. y Pican, S. (2021). Amianto en la construcción y cómo avanzar en la regulación de su eliminación permanente mediante la inertización y reciclaje. los casos de Italia y España, 96, (4), 395-400. <https://doi.org/10.6036/10170>
- Matos, Y. y Pasek, E. (2008). La observación, discusión y demostración: Técnicas de investigación en el aula, 14, (27), 33-52. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=76111892003>
- Menéndez, J y Sócrates, M. (2021). Contaminación del agua y suelos por relaves mineros, 11, (1), 141-154. <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>
- Organización Panamericana de la Salud (2024). *Plomo*. Hoja informativa sobre el plomo. OPS. <https://www.paho.org/es/temas/plomo>
- Picquart, M y Carrasco, I. (2017). De la temperatura y su dimensión. Dialnet. (11), 1-17. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6019786>

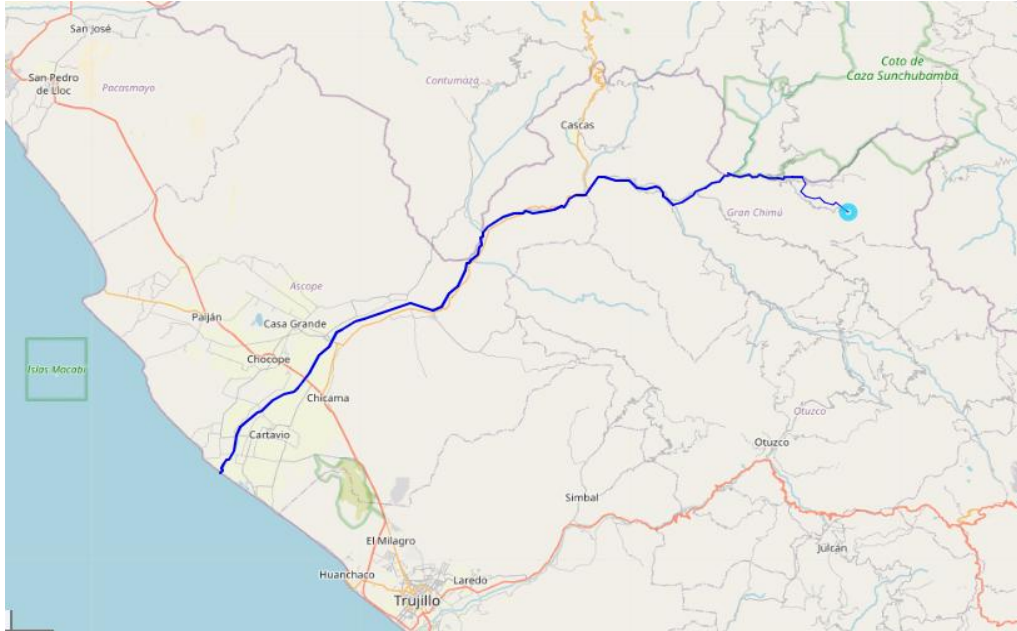
- Polo, M; Domínguez, E y Giraldez, J. (2021). Lixiviación de metales desde puntos con contaminación residual en la Cuenca del Guardiamar. Universidad de Córdoba.
https://abe.ufl.edu/faculty/carpna/files/pdf/zona_no_saturada/temas_de_investigacion_v5/4.pdf
- PRTR España (2024). Cd, *Cadmio y compuestos*. Gobierno de España. Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. <https://prtr-es.es/Cd-Cadmio-y-compuestos,15605,11,2007.html>
- Rincón, B. (2017). Sinterización y vitrificación de residuos enriquecidos de Li, Mn y Cr procedentes de procesos industriales. [Tesis de Doctorado, Universidad Miguel Hernández de Elche]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=136334>
- Rivas, E. (2020). Inertización de escombreras de centrales térmicas de carbón y recuperación de metales de interés. [Tesis de Doctorado, Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/64091>
- Rodríguez, H. (15 de enero de 2024). Propiedades del hierro (Fe). National Geographic España.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hierro-fe_18218
- Rodriguez, J. (2008). La contaminación de suelos la herencia que no cesa, 1. <http://hdl.handle.net/10334/2523>
- Salguero, K. (2017). Inertización de relaves mineros utilizando la vitrificación para su aprovechamiento en la construcción. [Tesis de Título, Universidad Internacional SEK]. <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3086>
- Simbaña, K. (2021). Inertización de metales pesados de un lodo de la industria metalmeccánica, utilizando el proceso de vitrificación ex situ. [Tesis de Título, Universidad Internacional SEK].
<http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4191>
- Torres, J., Mosquera, F., Narváez, A. y Sánchez, R. (2021). Proceso de vitrificación para estabilizar una escoria de fundición: estudio preliminar, 24, (2). <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11333>

- Trifunović, V. (2021). La vitrificación como método de remediación de suelos, 62, (3), 166 - 179. <https://doi.org/10.5937/zasmat2103166T>
- Universidad Nacional de La Plata (2020). *El suelo, un universo invisible*. Prosecretaría de Políticas Sociales. <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/98/27598/3f23fc987dbbda82587753c9796000a.pdf>
- Vidal, F. (2003). Desarrollo de una metodología de selección eco-eficiente de técnicas para remediar suelos contaminados con metales pesados. [Tesis de Maestría, Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey]. <http://hdl.handle.net/11285/569687>
- Voncken, JHL., Wilson, N., Yang, Y. y Xiao, Y. (2008). Tratamiento térmico y vitrificación de cenizas de caldera procedentes de un incinerador de residuos sólidos municipales, 154, 871-879. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.116>

ANEXOS

Anexo 1

Efluentes del Rio San Jorge



Anexo 2

Recolección de las muestras



Anexo 3

Tamizado de las muestras



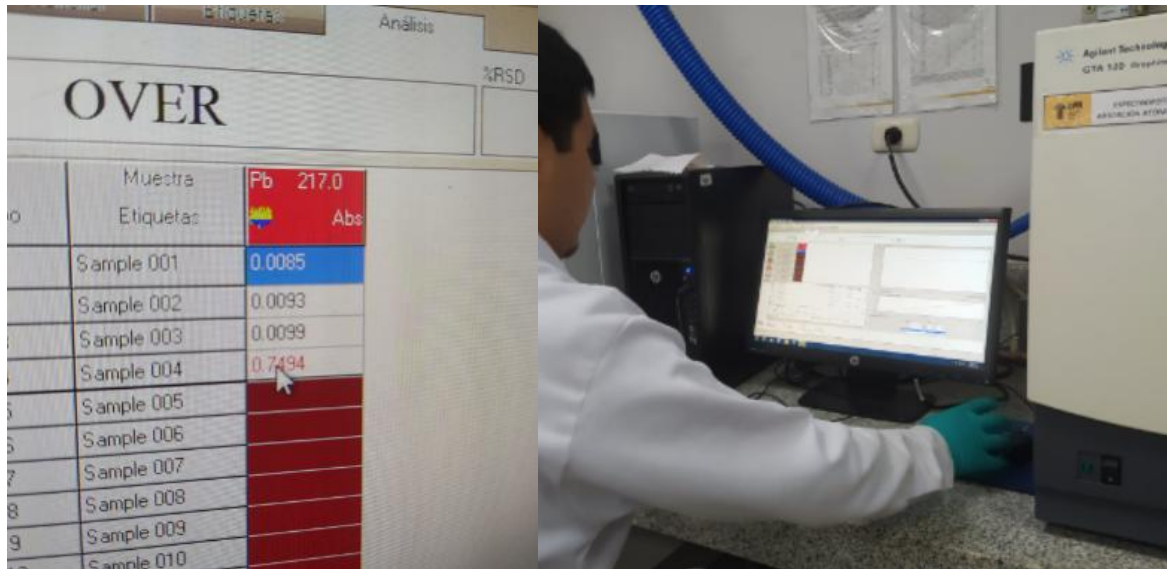
Anexo 4

Muestra 0



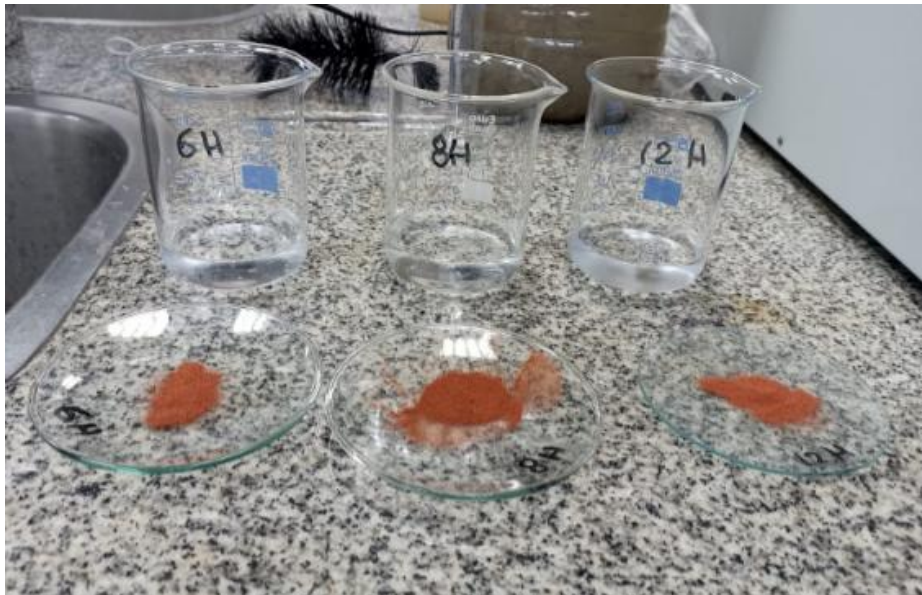
Anexo 5

Análisis de las muestras



Anexo 6

M1, M2 y M3



Anexo 7

M1, M2 Y M3 listas para lectura

