

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



**“BIOCARBON DE LODO DE PTAR PARA LA REDUCCIÓN DE ZINC
Y HIERRO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE LA LAGUNA
QUIULACOCHA, PASCO, 2023”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**

AUTORES:

COLLANTES ESQUIVES CESAR RAFAEL
LLERENA HUAPAYA OSCAR NEPTALI
OLAZABAL ESPINOZA MIGUEL ANGEL

Three handwritten signatures in blue ink, corresponding to the authors listed to the left.

ASESOR:

Mg. RICHARD JOAO HUAPAYA PARDAVÉ

A handwritten signature in blue ink, corresponding to the advisor listed to the left.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

Callao, 2023

PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)



VI CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 008-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 112 ACTA N°008-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

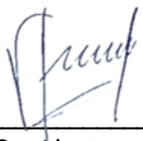
A los 1 días del mes de octubre del año 2023, siendo las 08:07 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/fyg-foyt-xpc>, el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

Dr.	Eduardo Valdemar Trujillo Flores	: Presidente
Mtro.	Carlos Odorico Tome Ramos	: Secretario
MsC.	María Antonieta Gutiérrez Díaz	: Vocal
Mg.	Luís Enrique Lozano Vieytes	: Suplente
MBA.	Richard Joao Huapaya Pardave	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los Bachilleres César Rafael Collantes Esquivas, Oscar Neptali Llerena Huapaya y Miguel Angel Olazabal Espinoza, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: **"BIOCARBON DE LODO DE PTAR PARA LA REDUCCIÓN DE ZINC Y HIERRO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE LA LAGUNA QUIULACOCHA, PASCO, 2023"**, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por Aprobado con la escala de calificación cualitativa Bueno y calificación cuantitativa Quince (15) la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por cerrada la Sesión a las 08:48 horas del día domingo 1 de octubre del año en curso.



Presidente



Secretario



Vocal



Asesor

Document Information

Analyzed document	1A; COLLANTES ESQUIVES; César Rafael_LLERENA HUAPAYA; Oscar Neptali_OLAZABAL ESPINOZA; Miguel Angel_IF TESIS.pdf (D174109662)
Submitted	9/18/2023 4:46:00 PM
Submitted by	
Submitter email	fiarn.investigacion@unac.edu.pe
Similarity	6%
Analysis address	unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Biochar_RevAB05092022.docx Document Biochar_RevAB05092022.docx (D143613904)		2
SA	Universidad Nacional del Callao / APEÑA MILLA - CASTELO VEGA - BIOCARBON DE LODOS PARA LA INMOVILIZACION DEL PLOMO EN SUELOS DEL AA.HH. VIRGEN DE GUADALUPE, MI PERU, 2022.pdf Document APEÑA MILLA - CASTELO VEGA - BIOCARBON DE LODOS PARA LA INMOVILIZACION DEL PLOMO EN SUELOS DEL AA.HH. VIRGEN DE GUADALUPE, MI PERU, 2022.pdf (D149897426) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		21
SA	Universidad Nacional del Callao / 1A; SALAZAR BUSTAMANTE; David Elías_CORO VALIENTE; Gary Ken Dario_IF TESIS.pdf Document 1A; SALAZAR BUSTAMANTE; David Elías_CORO VALIENTE; Gary Ken Dario_IF TESIS.pdf (D173991487) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		5
SA	Chavez Andres_Anteproyecto 2021.docx Document Chavez Andres_Anteproyecto 2021.docx (D119562922)		1
SA	TESIS FINAL FINAL.docx Document TESIS FINAL FINAL.docx (D117453796)		1
SA	Universidad Nacional del Callao / Hinostroza-Montes-León-EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ADSORCIÓN CON BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NARANJA A ESCALA LABORATORIO EN LA REMOCIÓN DE FENOLES DE UNA SOLUCIÓN SINTÉTICA, 2022.pdf Document Hinostroza-Montes-León-EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ADSORCIÓN CON BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NARANJA A ESCALA LABORATORIO EN LA REMOCIÓN DE FENOLES DE UNA SOLUCIÓN SINTÉTICA, 2022.pdf (D141801746) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		3

Entire Document

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

TÍTULO: BIOCARBÓN DE LODO DE PTAR PARA LA REDUCCIÓN DE ZINC Y HIERRO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE LA LAGUNA QUIULACOCHA, PASCO, 2023.

AUTOR (es):

COLLANTES ESQUIVES CESAR RAFAEL / CODIGO ORCID: 00090-0002-1592-6132 / DNI: 47781967

LLERENA HUAPAYA OSCAR NEPTALI/ CODIGO ORCID: 0009-0007-2670-5550/ DNI: 45854940

OLAZABAL ESPINOZA MIGUEL ANGEL/ CODIGO ORCID: 0009-0009-7121-4640/ DNI: 46438258

ASESOR(A): RICHARD JOAO HUAPAYA PARDAVÉ/ CODIGO ORCID: 0000-0002-4997-2041/ DNI: 44127158

CO-ASESOR(A): LUIGI BRAVO TOLEDO/ CODIGO ORCID: 0000-0002-2229-9467/ DNI: 71483456

LUGAR DE EJECUCIÓN: LABORATORIO EXTERNO

UNIDAD DE ANÁLISIS: LAS AGUAS ACIDAS DE LA LAGUNA QUIULACOCHA.

TIPO/ ENFOQUE/ DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: APLICADA/ CUANTITATIVO/ EXPERIMENTAL

TEMA OCDE: 1.05.08 CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

DEDICATORIA

A mi familia, amigos y mentores, quienes han sido mi apoyo inquebrantable a lo largo de este viaje académico. Su aliento y confianza me han impulsado a alcanzar este logro.

Collantes Esquives, Cesar Rafael

Con amor y cariño, dedico esta tesis a mis padres y hermanos por ser la motivación constante en este viaje del aprendizaje y el crecer como persona, todos los logros se los debo a ellos.

A mis amigos, quienes, con sus consejos, me inspiraron a seguir por el camino del buen profesional, y de excelencia como persona.

Llerena Huapaya, Oscar Neptali

A mi madre, por su amor y apoyo constante que me ha permitido lograr este objetivo; gracias por inculcarme buenos valores y permitir seguir avanzando.

A mis hermanas, por su cariño y apoyo constante durante este proceso e inspirarme hacia la superación.

Olazabal Espinoza, Miguel Angel

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor Ing. Richard Huapaya Pardavé y co-asesor Ing. Luigi Bravo Toledo, por su entrega, contribución y motivación durante la elaboración de la presente tesis.

Agradecemos a la Universidad Nacional de Callao por brindarnos la oportunidad de cursar estudios superiores y pertenecer a tan prestigiosa institución de investigación superior.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1. Descripción de la realidad problemática	12
1.2. Formulación del problema	13
1.2.1. Problema General	13
1.2.2. Problemas Específicos	14
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo General	14
1.3.2. Objetivos Específicos	14
1.4. Justificación	15
1.4.1. Económica	15
1.4.2. Ambiental	15
1.4.3. Legal	15
1.5. Delimitantes de la investigación	15
1.5.1. Teórico	15
1.5.2. Temporal	16
1.5.3. Espacial	16

II.	MARCO TEÓRICO	17
2.1.	Antecedentes	17
2.1.1.	Internacional	17
2.1.2.	Nacional	19
2.2.	Bases teóricas	21
2.2.1.	Biocarbón y su producción	21
2.2.2.	Biocarbón de lodo digerido de PTAR	28
2.2.3.	Aguas ácidas.....	28
2.3.	Marco conceptual	33
2.3.1.	Biocarbón de lodos de PTAR	33
2.3.2.	Reducción de hierro y zinc.	33
2.4.	Definición de términos básicos	34
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	35
3.1.	Hipótesis	35
3.1.1.	Operacionalización de las variables	36
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	37
4.1.	Diseño metodológico	37
4.2.	Método de investigación	37
4.2.1.	Caracterización del agua acida de la laguna	37
4.2.2.	Obtención de lodo de PTAR.....	37
4.2.3.	Preparación del biocarbón.....	37
4.2.4.	Caracterización del Biocarbón.....	38
4.2.5.	Procedimiento hierro	38

4.2.6. Procedimiento Zinc	38
4.2.7. Acondicionamiento del lugar a experimental	39
4.2.8. Toma de muestra durante El Tes-Jar	39
4.2.9. Diseño experimental.....	41
4.3. Población y muestra	43
4.3.1. Población	43
4.3.2. Muestra	43
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	44
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	44
4.5.1. Técnica	44
4.5.2. Instrumentos de recolección de datos	44
4.6. Análisis y procesamiento de datos	45
4.7. Aspectos éticos de la investigación	45
V. RESULTADOS	46
5.1. Resultados descriptivos	46
5.1.1. Resultados de las características físico-químicos del agua contaminada simulada.....	46
5.1.2. Resultados de las características del biocarbón de lodos de PTAR a diferentes temperaturas.....	46
5.1.3. Resultados experimentales del proceso de tratamiento	48
5.1.4. Efectos de los de los indicadores de estudio en la reducción de Hierro y Zinc	51
5.2. Resultados Inferenciales	55
5.2.1. Análisis de la normalidad	55

5.2.2. Análisis de la homogeneidad de varianza	57
5.2.3. Análisis Multivariado de la varianza (MANOVA)	58
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	65
6.1.1. Contrastación con hipótesis específicas.....	65
6.1.2. Contrastación con la hipótesis General	67
6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares	67
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	70
VII. CONCLUSIONES	71
VIII. RECOMENDACIONES	73
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS	82
Anexo 1 Matriz de consistencia	82
Anexo 2 Metodología para desarrollo del hierro	83
Anexo 3 Metodología para desarrollo del zinc	90
Anexo 4 Registro fotográfico de la toma de muestra de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha en Pasco	96
Anexo 5 Registro fotográfico de la toma de muestra de lodos de la PTAR San Antonio de Carapongo	97
Anexo 6 Registro fotográfico del proceso de secado del lodo de PTAR	98
Anexo 7 Registro fotográfico del proceso de generación de Biocarbón de PTAR mediante proceso de pirólisis a temperaturas de 350°C y 650 °C en el horno Pirolítico.	99
Anexo 8 Registro fotográfico del proceso de molienda y tamizado del biocarbón	100

Anexo 9 Registro fotográfico del proceso de pesado de la dosis de biocarbón y su aplicación sobre la muestra de agua ácida	101
Anexo 10 Registro fotográfico de las muestras en el agitador	102
Anexo 11 Registro fotográfico de las muestras tratadas	103
Anexo 12 Registro fotográfico de algunas mediciones del equipo espectrofotómetro DR1900 sobre las muestras tratadas	104
Anexo 13 Resultados de análisis de laboratorio del biocarbón de lodo de PTAR105	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de diferentes pretratamientos termoquímicos en términos de condiciones de operación y rendimiento de Biocarbón</i>	23
Tabla 2 <i>Operacionalización de las Variables</i>	36
Tabla 3 <i>Factores experimentales</i>	41
Tabla 4 <i>Matriz experimental con el diseño factorial</i>	42
Tabla 5 <i>Caracterización físico-química del agua ácida de la laguna Quiulacocha</i>	46
Tabla 6 <i>Resultados de la matriz experimental con los diferentes tratamientos en la reducción de Hierro y Zinc</i>	50
Tabla 7 <i>Resultado descriptivo de la reducción de Hierro y Zinc utilizando el biocarbón de lodos de PTAR como adsorbente</i>	51
Tabla 8 <i>Normalidad de los indicadores de remoción del Hierro (Fe) y Zinc (Zn) y la concentración de metales</i>	56
Tabla 9 <i>Normalidad de los indicadores de reducción del Hierro (Fe) y el Zinc (Zn) y la Dosis de biocarbón</i>	56
Tabla 10 <i>Normalidad de los indicadores de reducción de Hierro (Fe) y Zinc (Zn) y la Temperatura de Pirolisis</i>	57
Tabla 11 <i>Prueba de homogeneidad de varianza de Levene para la Remoción de Hierro y Zinc</i>	58
Tabla 12 <i>Prueba multivalente en diferentes tipos de modelos para el criterio de elegibilidad de la regresión lineal</i>	60
Tabla 13 <i>MANOVA de los diferentes indicadores de la remoción de Hierro y Zinc</i>	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Resumen de las tendencias en las propiedades de biocarbón en función de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia.</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2 <i>Ciclo de Biogeoquímico de los Metales Pesados</i>	32
Figura 3 <i>Diagrama de flujo del proceso de preparación y aplicación del biocarbón.</i>	40
Figura 4 <i>Espectros Infrarrojos FT-IR de los biocarbón de lodos de BC-PTAR-350°C y BC-PTAR-650°C</i>	47
Figura 5. <i>Efectos de la dosis de biocarbón y temperatura de pirolisis sobre la reducción de Hierro</i>	52
Figura 6 <i>Efectos de la temperatura de pirólisis y la concentración sobre el % de reducción de Hierro</i>	53
Figura 7 <i>Efectos de la dosis de biocarbón y temperatura de pirolisis sobre el % de reducción de Zinc</i>	54
Figura 8 <i>Efectos de la temperatura de pirólisis sobre % de reducción de zinc</i>	55

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- ANOVA** Análisis de la Varianza
- BC** Biocarbón
- CE** Contaminantes Emergentes
- DNI** Documento Nacional de Identidad
- ECA** Estándar de Calidad Ambiental
- LMP** Límites Máximos Permisibles
- MINAM** Ministerio del Ambiente
- ORCID** Open Research and Contributor ID
- PTAR** Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
- R.M.** Resolución Ministerial

RESUMEN

La presencia de metales pesados en los lagos es una importante fuente de contaminación, con consecuencias negativas para la vida acuática y la cadena alimentaria. La presente investigación tiene como objetivo evaluar si el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

El método aplicado fue de carácter Hipotético-deductivo que comenzó con la obtención y caracterización del agua ácida de la laguna Quiulacocha, seguido de la obtención de la muestra de lodo de PTAR. Luego, se preparó el biocarbón en un acondicionamiento que dio lugar a la experimentación de distintos tratamientos empleando los factores dosis de biocarbón, temperatura de pirólisis y concentración de los metales en la muestra de agua ácida, con las cuales se evaluó la reducción de los metales de Hierro y Zinc. Par esta investigación se utilizó el software estadístico SPSS y la significación los parámetros individuales se evaluaron mediante el análisis de multivariante de la varianza (MANOVA).

Los resultados de los experimentos de prueba mostraron que el biocarbón medido a 20g y 10g de masa y expuesto a una temperatura de 650°C y 350°C, en el tratamiento de las distintas muestras presentó una reducción del nivel de hierro y zinc. Además, los indicadores (dosis de biocarbón -temperatura de pirólisis -concentración de los metales) que explican las condiciones en que el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de zinc y hierro tienen un efecto significativo.

Los experimentos de prueba mostraron que el biocarbón obtuvo resultados significativos en la reducción de hierro y zinc en todos los tratamientos con una concentración de solución sintética inicial de 1950 mg/L y 81mg/L respectivamente. Se obtuvo una eficiencia media en la reducción de hierro y zinc de 75.41% y 66.17% respectivamente. Así se concluye que el biocarbón tiene un efecto significativo en la reducción de hierro y zinc de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

ABSTRACT

The presence of heavy metals in lakes is an important source of pollution, with negative consequences for aquatic life and the food chain. The objective of this research is to evaluate if the biochar from WWTP sludge allows the reduction of Zinc and Iron in the acid waters of the Quiulacocha lagoon, Pasco, 2023.

The applied method was of a Hypothetic-deductive nature that began with the obtaining and characterization of the acid water of the Quiulacocha lagoon, followed by the obtaining of the WWTP mud sample. Then, the biochar was prepared in a conditioning that led to the experimentation of different treatments using the factors biochar dose, pyrolysis temperature and concentration of metals in the acid water sample, with which the reduction of metals was evaluated of Iron and Zinc.

The results of the test experiments showed that the biochar measured at 20g and 10g of mass and exposed to a temperature of 650°C and 350°C, in the treatment of the different samples presented a reduction in the level of iron and zinc. In addition, the indicators (Biochar dose -Pyrolysis temperature -Metal concentration) that explain the conditions in which the biochar from WWTP sludge allows the reduction of zinc and iron have a significant effect.

The test experiments showed that the biochar obtained significant results in the reduction of iron and zinc in all treatments with an initial synthetic solution concentration of 1950 mg/L and 81mg/L respectively. An average efficiency in the reduction of iron and zinc of 75.41% and 66.17% respectively was obtained. Thus, it is concluded that biochar has a significant effect on the reduction of iron and zinc in the acid waters of the Quiulacocha lagoon, Pasco, 2023.

INTRODUCCIÓN

La laguna Quiulacocha almacenó relaves procedentes de la Concentradora Paragsha desde el año 1943 hasta 1992, acumulando aproximadamente 78 millones de toneladas de relaves en un área de 115 Has. Esta laguna se encuentra catalogada como un pasivo ambiental minero y su historia comienza en el año 1900 con la llegada de la Cerro de Pasco Cooper Corporation, quienes empezaron con la disposición del relave minero en la laguna Quiulacocha, iniciando con ello su desaparición de especies de flora y fauna autóctona, siendo un problema histórico por la contaminación de ambientes acuáticos causado por la acumulación de relaves (Robles, 2019).

Para el tratamiento de las aguas ácidas existe muchos métodos convencionales de tratamiento, el uso de fosforo para la remoción del hierro en las aguas ácidas ha sido poco estudiado (Ruihua et al. 2011). El fosforo se puede presentar de diferentes especies y en mayor cantidad como parte de los lodos residuales de plantas de tratamientos anaerobio o aerobios (Zhang et al., 2022). La preparación de biocarbón con alta carga de fosforo puede ser un enfoque eficaz ya que fácilmente forma complejos de fosfato y precipitaría a los metales pesados (Zhang et al., 2021).

En consecuencia, el objetivo general de la presente investigación es evaluar si el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc (Zn) y Hierro (Fe) de las aguas ácidas de la Laguna Quiulacocha.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La contaminación de ecosistemas por metales pesados es un problema que aqueja a muchos países en el mundo (Sun, Wang y Hou 2018). Las aguas ácidas que contienen altas concentraciones de metales pesados producen una contaminación multifactorial compleja formada por interacciones químicas, físicas y biológicas complejas que generan graves impactos ambientales (Gao et al. 2019).

El Perú es reconocido como un país importante en reservas mineras, lo cual ha impulsado la producción y exportación de metales. El tratamiento de las aguas ácidas con alto contenido de hierro es uno de los desafíos ambientales más importantes que enfrenta la industria en todo el mundo (Idaszkin, Carol y del Pilar 2017), las mismas que pueden ser remediadas mediante procesos activos o pasivos para su prevención, mitigación y control (Bejarano & Estacio, 2019).

Los metales pesados se encuentran en cantidades significativas que causan graves problemas para la vida acuática y, por lo tanto, para toda la cadena alimentaria. Además, la vida vegetal también se ve afectada negativamente por la presencia de metales pesados en el suelo. El pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas también se ven afectados (Ore Nuñez 2021) .

Los lodos de depuradora son un subproducto importante en el proceso de tratamiento de aguas residuales que contienen una mezcla de nutrientes y contaminantes tóxicos. Aunque estos lodos son valiosos debido a su contenido de nutrientes, como el carbono, nitrógeno y fósforo, también contienen sustancias peligrosas, como metales pesados, patógenos y contaminantes orgánicos persistentes, lo que limita su reciclaje y reutilización (Penido et al. 2019).

El uso de lodos como materia prima para preparar biocarbón es un nuevo método de tratamiento de lodos de depuradora, que ha sido ampliamente investigado en los últimos años (Udayanga et al., 2019). Las propiedades especiales

del biocarbón derivado de la biomasa residual, incluida su gran superficie, estructura porosa, grupos funcionales superficiales, lo convierten en un adsorbente más adecuado para la eliminación de contaminantes emergentes (CE) en el medio acuático (Callegari y Capodaglio 2018). Los métodos tradicionales para tratar los lodos incluyen el reciclaje agrícola, los rellenos sanitarios y el tratamiento térmico. El tratamiento de lodos de depuradora es poco común debido al alto costo y a la posible contaminación secundaria que puede generar (Huang et al. 2018).

El uso de biocarbón a base de lodos como adsorbente para tratar metales pesados en aguas ácidas ha atraído una atención considerable (Godlewska et al., 2019). Por lo tanto, el biocarbón ofrece una alternativa altamente eficiente debido a su efectividad, rendimiento mejorado en la eliminación de contaminantes de aguas residuales, métodos de producción de bajo costo, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente (Shen et al. 2019).

1.2. Formulación del problema

Por todo lo expuesto, nos planteamos que los efectos del lodo residual generado en una PTAR que tiene un proceso de tratamiento aerobio puede mostrar diferentes eficiencias de acuerdo a sus diferentes dosificaciones en la reducción de Zinc (Zn) y Hierro (Fe) de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco. El lodo de un proceso aerobio contiene compuestos residuales oxidados y gran cantidad de fósforo residual, por lo tanto, la transformación parolítica de este lodo a biocarbón generaría diferentes efectos sobre la reducción de metales pesados. Por consiguiente, nos formulamos la pregunta.

1.2.1. Problema General

¿En qué medida el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál será la dosis de biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?
- ¿Cuál será la temperatura de obtención del biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?
- ¿Cuál será la concentración de metales pesados que influya la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar si el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la dosis de biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.
- Determinar la temperatura de obtención del biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.
- Determinar que la concentración de metales pesados influye en la reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

1.4. Justificación

1.4.1. Económica

Esta investigación permitirá desarrollar un tratamiento sostenible y de bajo costo para la remediación de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, si bien la adsorción física (floculación/coagulación) es un método simple y fácil sin contaminación secundaria (Yang et al., 2018) usar los lodos de PTAR para remediar las aguas ácidas permitirá desarrollar un sistema con alta viabilidad económica.

1.4.2. Ambiental

Esta investigación permitirá controlar un correcto tratamiento de las aguas ácidas del depósito de relaves de Quiulacocha, y secuencialmente, permitirá viabilizar alternativas a futuros proyectos de inversión dónde la aplicación sea a escala de plantas de tratamiento. Este tipo de tratamiento tiene una baja carga ambiental, su gasto de energía es mínimo.

1.4.3. Legal

Esta investigación en curso brindará la oportunidad de determinar la dosis más eficiente requerida para el tratamiento del agua en cuestión, con el objetivo de disminuir los niveles de zinc y hierro que excedían los estándares de calidad ambiental establecidos para el agua de categoría 4. Este estudio busca contribuir a la posible solución del grave problema de la contaminación por aguas ácidas que afecta a la comunidad de Quiulacocha y a una amplia zona de Cerro de Pasco.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Teórico

Como delimitación teórica se plantea desarrollar los alcances teóricos referente a los campos de conocimientos de “Biocarbón y su producción”, Biocarbón de lodo de PTAR” y lo referente a la teoría de “aguas ácidas”. Así también sobre la toma de muestras se especifica solo una PTAR que cuenta con algún tratamiento aerobio

1.5.2. Temporal

El tiempo en que se recolectó y analizó los datos fue desde el mes de mayo hasta agosto del 2023, debido a la duración del ciclo taller de tesis.

1.5.3. Espacial

La recolección de la muestra de lodo se realizó en la PTAR de San Antonio de Carapongo, ubicado en el distrito de Ate.

La preparación del Biocarbón se realizó en la planta operadora de residuos sólidos RESISOL.S.A.C, ubicada en San Antonio de Carapongo, y el experimento se realizó en un laboratorio externo.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Fan et al., (2020) en la investigación titulada “*Uso de lodos de depuradora con alto contenido de cenizas para la producción de biochar y sorción de CU (II)*”; tuvo como objetivo evaluar la aplicación de los lodos de depuradora de dos ciudades, Chongqing y Kunming, para producir biochar mediante la pirólisis a diferentes temperaturas. Las propiedades fisicoquímicas del biochar se investigaron mediante características químicas a granel (como FTIR, XPS, análisis Raman y análisis elemental) y biomarcadores moleculares de ácido benceno policarboxílico (BPCA), después de lo cual se correlacionaron con las características de sorción. En comparación con el biochar del lodo de aguas residuales de Chongqing (CSS), el biochar del lodo de aguas residuales de Kunming (KSS) mostró una mayor polaridad, un área de superficie específica más grande (SSA) y más grupos funcionales, pero un menor grado de grafitización y aromatización. Se pudo concluir que un mayor contenido de Al en el lodo de aguas residuales fue beneficioso para la ampliación del volumen de poros y la retención del grupo funcional durante el proceso de pirólisis.

Ni et al., (2019) en la investigación titulada “*Adsorción competitiva de metales pesados en solución acuosa sobre biochar derivado de lodo digerido anaeróbicamente*”; tuvo como objetivo evaluar la adsorción competitiva de metales pesados por biochar derivado de lodo digerido anaeróbicamente. En este trabajo, el biochar de lodo digerido anaeróbicamente fue sintetizado y caracterizado para explorar el comportamiento competitivo de Pb (II) y Cd (II) ampliamente coexistido. Los efectos mutuos y los mecanismos internos de su adsorción en el biochar estudiado se investigaron sistemáticamente a través de sistemas de un solo metal y metales binarios. Se pudo concluir mediante los resultados de la isoterma de adsorción de componentes binarios que se produjo la adsorción competitiva entre

dos metales, así como la preferencia de biochar por Pb (II) en comparación con Cd (II).

Van Poucke et al., (2019) en la investigación titulada “*Sorción de metales por biocarbon: una compensación entre la concentración de fosfato y carbonato según las condiciones de pirólisis*”; tuvo como objetivo evaluar la capacidad para absorber metales en sistemas acuáticos de biochar generados por la pirólisis de tres materias primas: madera de pino, hierba y estiércol de vaca, bajo diversas condiciones. Las materias primas se pirolizaron a 2 temperaturas diferentes (350 °C y 550 °C) y 2 tiempos de residencia diferentes (10 y 60 min) y los biochar resultantes se evaluaron según su capacidad para inmovilizar Pb, Cu, Cd y Zn. El biochar producido a partir de estiércol de vaca y pirolizado a 550 ° C durante 10 min mostró la mejor sorción para todos los metales considerados.

Tang et al., (2019) en la investigación titulada “*Influencia de la temperatura de pirólisis en la producción de biochar de lodos digeridos y su aplicación para la eliminación de amonio de las aguas residuales municipales*”; tuvo como objetivo evaluar la posible aplicación de Biochar (biocarbón), producido a partir de la pirólisis de lodos digeridos, para eliminar el amonio del agua. El lodo del digester anaeróbico se recolectó de una planta municipal de tratamiento de aguas residuales en Alberta, Canadá, y se produjeron biochars individuales a incrementos de temperatura de 50 ° C entre 350 ° C y 550 ° C. Las características químicas de los biochars resultantes se determinaron mediante análisis elemental, microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de área de superficie BET y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Se pudo concluir que el rendimiento del biochar disminuyó con el aumento de la temperatura de pirólisis, y el biochar producido a 450 ° C (BC450) tuvo la mayor capacidad de eliminación de amonio debido a su mayor área superficial y densidad de grupo funcional.

Karim et al., (2019) en la investigación titulada “*Co-utilización de residuos de lodos de efluentes y biomasa rica en nutrientes para la producción de fertilizantes biochar a través de diferentes tratamientos térmicos*”; tuvo como objetivo utilizar los

residuos de lodos de efluentes y biomasa de pedúnculo de banano para el desarrollo de fertilizantes complejos produciendo Biochar (biocarbón). Diferentes tratamientos térmicos, como la pirólisis lenta (700 ° C) y el procesamiento térmico con plasma (1200–1500 ° C) se probaron para la producción de biochar con las características deseadas. El procesamiento con plasma produjo biochar con mayor P total (8.53 - 11.81%) y K (17.13 - 21.9%) que la pirólisis lenta (P-4.2% y K-11.5%). En contraste, la pirólisis lenta resultó en un mayor rendimiento de biochar (42%) y contenido de carbono total (34.1%) que en plasma (28 - 34% y 10.9 - 21.8%). Estos resultados demuestran el potencial de utilización de los desechos y procesos térmicos antes mencionados para la producción de fertilizantes complejos de biochar enriquecidos con K y P.

2.1.2. Nacional

Pulcha & Valencia, (2019) en su tesis titulada “*Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales*”; tuvo como objetivo evaluar en los humedales artificiales la remoción de contaminantes ecotóxicos de aguas de residuales de mina. Se diseñó un humedal artificial de flujo horizontal sub superficial con las especies vegetales *Schoenoplectus lacustris* (carrizo) y *Schoenoplectus californicus* (totora) con material filtrante como arena, piedra, tierra y grava. Se analizó los parámetros de zinc, plomo y cobre. El tratamiento planteado fue satisfactorio debido a que se pudo reducir los parámetros evaluados a valores por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP).

De La Cruz Carpio, (2018) en su tesis titulada “*Eficiencia del biochar a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo a nivel laboratorio UCV, 2018*”; tuvo como objetivo la evaluación de la eficiencia de inmovilización del plomo en suelo mediante biochar generado de residuos de poda. Se utilizó el arbusto *Schinus terebinthifolius* (molle costeño) proveniente del Cementerio Presbítero Maestro, Cercado de Lima. El biochar se pirolizó a 500°C durante 2 horas, se controló la temperatura y tiempo mediante un termómetro digital. Se realizaron

tratamientos, cada tratamiento se aplicó 20% de biochar, y se analizó a los 20 días la concentración de plomo en el suelo, con cinco repeticiones cada una. Finalmente se logró remediar plomo en el suelo con 50.29% de eficiencia a una aplicación del 20% de biochar en el tratamiento del testigo (T₁).

Ipanaque & Rocío, (2018) en su tesis titulada "*Uso del biochar de excretas porcina y avícola en la reducción de cadmio en suelo agrícola contaminado, Huaral, 2018*"; tuvo como objetivo la determinación del efecto del biochar en la reducción de cadmio en suelo agrícola mediante biochar proveniente de excretas porcina y avícola. Se aplicaron cuatro tratamientos con dosificación de 0%,5%,10%,15% y tres repeticiones con una maceta como unidad experimental para cada biochar, tanto para porcina como avícola. El biochar se sometió a un proceso pirolítico con una temperatura promedio de 300°C. Finalmente se evidenció que el tratamiento con dosificación al 5% fue el más óptimo.

Lamadrid & Milián, (2016) en su tesis titulada "*Uso comparativo de los métodos de ultrafiltración y floculación química para la remoción de metales presentes en el drenaje ácido de la unidad minera la cima*"; tuvo como objetivo analizar y comparar la reducción del Fe, Ni y Mg en el drenaje ácido de mina mediante ultrafiltración y floculación química. El drenaje se obtuvo de Cajamarca, la Mina de oro y cobre situada en 6°40'48" S, 78°31'48" W. Los parámetros de evaluación se basaron en el D.S N° 010-2010 MINAM (ECA Agua) y D. N° 32327-S de Costa Rica. Finalmente se obtuvo que el método que presenta una mayor remoción de Fe, Ni y Mg es el método de ultrafiltración con 99.23%, 86.70% y 99.01% respectivamente.

Santos, (2010) en su tesis titulada "*Biosorción de metales pesados empleando lodos activados*"; tuvo como objetivo evaluar la remoción de metales pesados (Cu y Zn) de las aguas residuales industriales mediante la biosorción de lodos activados procedentes de una PTAR, determinando la influencia de parámetros (pH, capacidad de biosorción, tiempo de equilibrio, etc.) que influyen en el proceso de biosorción. Se tomó como referencia las concentraciones de Cu y

provenientes del drenaje ácido de mina de Túnel Kingsmill. Los lodos fueron sometidos a inactivación térmica, molienda y se tamizaron para ser empleados en cada una de las pruebas. Para la biosorción se utilizó como reactores matraces Erlenmeyer de 125 mL, donde entraban en contacto con una cantidad de biosorbente y una solución metálica de Zn o Cu, luego eran sometidas a agitación durante un tiempo determinado. Se utilizó la espectroscopia de absorción atómica para la determinación de concentración de metales. Finalmente se obtuvo eficiencias de remoción del 98.73% para para el Zn y de 67.97% para el Cu.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Biocarbón y su producción

El biocarbón, también conocido como carbón vegetal cuando se produce a partir de biomasa leñosa, es el resultado sólido de la pirólisis de la biomasa, una práctica que ha sido empleada a lo largo de miles de años. Durante este proceso, parte de la biomasa se descompone, pero gran parte de su contenido de carbono se mantiene intacto. Este producto adquiere propiedades alteradas, volviéndose más rico en carbono y, por lo tanto, más adecuado como sustituto en procesos técnicos. La elección de las condiciones de la materia prima y la carbonización depende de las propiedades específicas que se deseen en el carbón resultante. Además de sus aplicaciones técnicas en la generación de calor, la producción de energía, la purificación de gas y agua, así como la metalurgia, el biocarbón también se ha utilizado como una enmienda del suelo para mejorar su fertilidad y para el secuestro de carbono. (Weber y Quicker 2018).

2.2.1.1. Procesos termoquímicos para la producción de biocarbón

El biocarbón se produce a través de la conversión termoquímica de biomasa. Los procesos termoquímicos incluyen pirólisis, torrefacción (seca o húmeda), gasificación y procesamiento hidrotérmico.

i. La pirolisis

Es la técnica principal utilizada para producir biocarbón. Es un proceso que descompone térmicamente la biomasa calentándola a temperaturas elevadas bajo condiciones inertes controladas (es decir, muy poco O₂ o bajo una atmósfera de gas inerte como N₂) (Lee, Sarmah y Kwon 2019).

ii. La torrefacción seca

Calienta la materia prima de biomasa a 200 – 300 °C a presión ambiente en un ambiente inerte durante 30 minutos a unas pocas horas (Rousset et al., 2012).

iii. La carbonización hidrotérmica.

Conocida como torrefacción húmeda, brinda una alta eficiencia de conversión, no requiere un paso de secado previo de la materia prima y opera a temperaturas relativamente bajas en comparación con otros procesos termoquímicos utilizados para producir biocarbón. Se lleva a cabo en agua a 180-260 °C durante 5 minutos a 6 horas (Hoekman et al., 2013).

iv. La gasificación.

Es un proceso de combustión parcial de biomasa a temperaturas más altas (600-1200 °C) que la pirólisis con un tiempo de residencia de 10-20 segundos (Brewer et al., 2009).

v. Torrefacción.

Una pirólisis en el rango de temperatura de hasta 300°C, mejora significativamente una serie de características problemáticas de la biomasa cruda. Entre ellos se encuentran propiedades mecánicas como la molienda (Weber y Quicker 2018).

Si bien la pirólisis y la gasificación rápida también dan como resultado un sólido con un mayor contenido de carbono (por así decirlo, biocarbón),

esto es simplemente un subproducto del proceso y la calidad a menudo no es suficiente para muchas aplicaciones (Quicker y Weber 2016).

Entre los procesos termoquímicos, la torrefacción en seco y la gasificación no son adecuados para producir Biochar (Lee, Sarmah y Kwon 2019).

En la Tabla 1 se especifica la clasificación de diferentes pretratamientos termoquímicos en términos de condiciones de operación y rendimiento de Biocarbón, especificando el porcentaje del rendimiento en peso.

Tabla 1

Clasificación de diferentes pretratamientos termoquímicos en términos de condiciones de operación y rendimiento de Biocarbón

Proceso	Operación	Temp. °C)	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Tiempo de residencia	Rend. Biochar (% peso)
Pirólisis	Lento	300-800	5-7	>1 h	35-50
	Rápido	400-600	300-800	0.5-10s	15-35
	Flash	400-1000	~1000	<2 s	10-20
Torrefacción seca		200-300	10-15	30 min-4 h	60-80
Gasificación		600-1200	50-100 (°C s ⁻¹)	10-20 s	<10
Hidrotermal carbonización		180-260	5-10	5 min – 12 h	45-70

Nota: Extraído de *Kambo & Dutta, 2015; Liu, Jiang, & Yu, (2015)*

2.2.1.2. Producción de Biocarbón

El carbón vegetal se produce a partir de materias primas leñosas y se ha fabricado y utilizado durante varios miles de años. Aunque el carbón vegetal es el tipo de biocarbón más común y más conocido, todos los materiales biogénicos pueden convertirse principalmente en biocarbón (Quicker y Weber 2016).

El proceso comienza con el secado de biomasa. Se pueden distinguir tres productos: gases permanentes, una o más fases líquidas (agua y alquitrán) y un residuo sólido. Las vías de reacción a estos diferentes productos son en parte

competidoras y la distribución del producto puede verse influenciada por las condiciones del proceso, principalmente la temperatura del proceso y el tiempo de residencia (Weber y Quicker 2018).

En la producción de biocarbón, el enfoque principal se centra en obtener un producto sólido rico en carbono. Este aumento en el contenido de carbono fijo en el sólido se produce debido a la evaporación del agua y la liberación de componentes volátiles. Se considera que la polimerización de compuestos orgánicos en vapores y gases puede contribuir a la formación de un carbón secundario, lo que aumenta el rendimiento sólido. Este proceso implica una velocidad de calentamiento baja y un tiempo de permanencia prolongado. En una metodología tradicional de producción de carbón, como la de los pozos de carbón, puede tomar varias semanas para completar la carbonización. Las temperaturas típicas para la pirólisis lenta rondan los 500°C, aunque esto puede variar según las características deseadas del producto final. Si se busca un contenido de carbono muy alto, superior al 95%, pueden requerirse temperaturas de tratamiento cercanas a los 1000°C, especialmente en el caso de materias primas leñosas, pero esto puede presentar desafíos en el procesamiento de residuos agrícolas y otros materiales con bajos puntos de fusión de cenizas. Por lo tanto, por lo general, no se suele superar la marca de los 700°C en la pirólisis, y cuando se realiza en el rango de temperaturas entre 200 y 300°C, se le denomina torrefacción (Weber & Quicker, 2018).

2.2.1.3. Características de Biocarbón

La biomasa está compuesta principalmente por los tres compuestos orgánicos celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos se comportan de manera diferente durante el tratamiento térmico y, por lo tanto, la composición de la biomasa influye directamente en el rendimiento y las propiedades del producto. La hemicelulosa describe un grupo de polisacáridos con una estructura de cadena ramificada. Es el más reactivo de los tres componentes principales y se descompone a temperaturas de aproximadamente 220-315 °C (Yang et al., 2007).

La destrucción de la hemicelulosa en la biomasa es el proceso principal en la torrefacción. Los cambios más significativos en casi todas las propiedades ocurren en el pequeño rango de temperatura de la descomposición de la hemicelulosa, lo que hace que la torrefacción sea un proceso muy sensible que puede ser difícil de controlar. La celulosa también es un polisacárido, pero a diferencia de la hemicelulosa, su estructura no está ramificada. Es térmicamente más estable, se descompone a temperaturas entre 280 y 400 ° C Por lo tanto, la descomposición no ocurre en un rango de temperatura limitado, como en el caso de la hemicelulosa y la celulosa (Quicker & Weber, 2016).

En cambio, la lignina se descompone en un amplio rango de temperatura debido a la gran cantidad de grupos funcionales con diferentes estabilidades térmicas. La degradación térmica comienza a 200 ° C y puede requerir temperaturas de hasta 900°C para completarse (dependiendo del tiempo de residencia (Yang et al., 2007).

2.2.1.4. Propiedades del Biocarbón

Para la mayoría de las propiedades, la tendencia general es clara. Un mayor grado de carbonización, realizado por un aumento en la temperatura y / o el tiempo de residencia, conduce a una disminución en el rendimiento de masa y energía. El contenido relativo de carbono del carbón aumenta, mientras que el contenido de oxígeno e hidrógeno disminuye. No se ve una dependencia clara del contenido de nitrógeno (Weber y Quicker 2018).

Si bien la composición relativa, basada en materia seca y libre de cenizas, sugiere que se produce un sólido altamente carbonoso, debe tenerse en cuenta que la desvolatilización provoca un aumento significativo en el contenido de cenizas. Esto es importante para aplicaciones prácticas, ya que los caracteres e inorgánicos se utilizan como una entidad. Como resultado del aumento del contenido de carbono, el contenido de energía y la cantidad de carbono fijo aumentan con la temperatura. La disminución de los grupos funcionales durante la pirólisis conduce a un aumento en el valor de pH del carbón (Weber y Quicker 2018).

Los gases desvolatilizantes dejan una estructura porosa y la porosidad (junto con el volumen de poro y la distribución del tamaño de poro) influye directamente en una serie de otras propiedades, como la densidad, la estabilidad mecánica, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de agua. Aunque la porosidad generalmente aumenta durante la carbonización, se ha sugerido que el tratamiento a temperaturas muy altas conduce a una contracción de la estructura sólida, lo que resulta en una disminución final de la porosidad y un aumento de la densidad (Weber y Quicker 2018).

2.2.1.5. Influencia de la temperatura en las propiedades del biocarbón

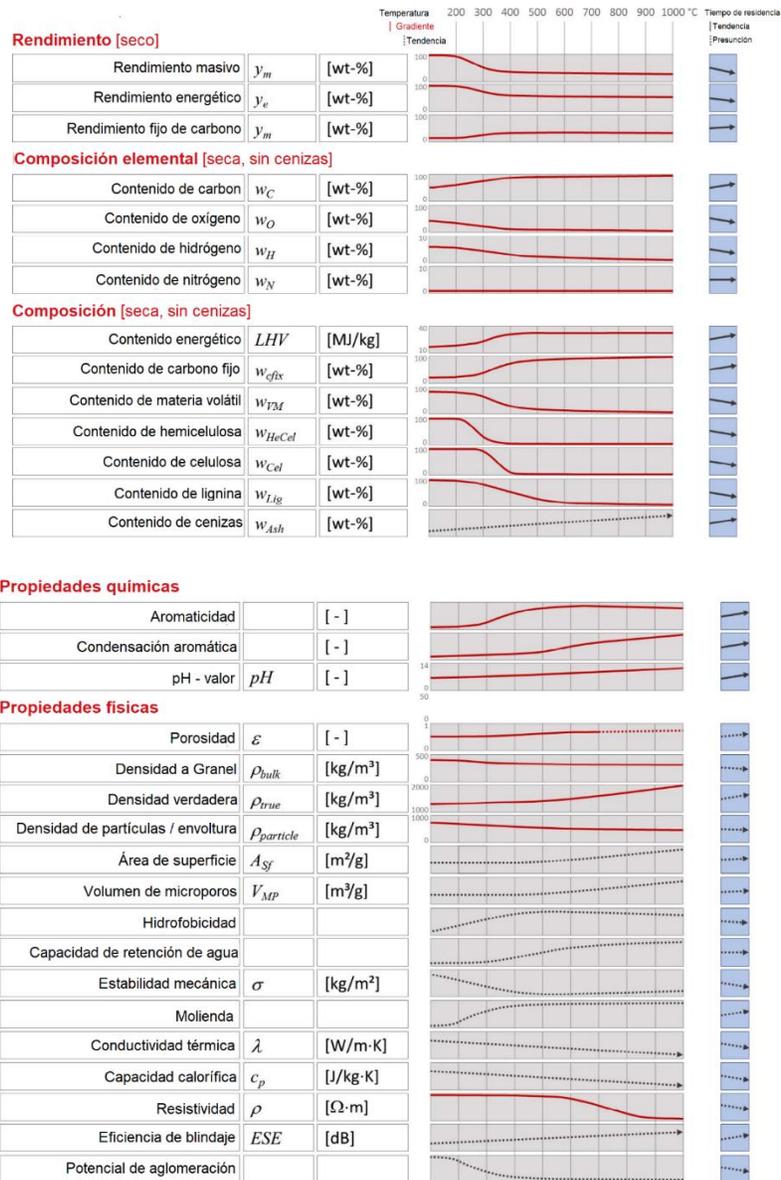
La influencia de la temperatura de pirólisis se muestra el área gris de la Figura 1. En la Figura 1 se muestran las tendencias y conclusiones que observó Weber & Quicker, (2018) de la evaluación de la base de datos de biocarbón de 210 publicaciones consultada y los resultados de experimentos realizados por él mismo.

Para la porosidad, existen resultados contradictorios para las altas temperaturas, por lo que el gradiente no se proporciona para todo el rango de temperatura, sino que se cambia a una línea de tendencia. Para algunas propiedades (es decir, conductividad térmica, capacidad calorífica, eficiencia de protección electromagnética), solo unos pocos experimentos o publicaciones estaban disponibles. Para estos, una tendencia se indica con una flecha gris discontinua. Además de la temperatura, el tiempo de residencia se muestra como una condición de proceso de influencia adicional (cuadros azules a la derecha de la figura). Generalmente se puede decir que la influencia del aumento del tiempo de residencia imita la influencia del aumento de la temperatura, ya que ambos conducen a un mayor grado de carbonización. Sin embargo, la influencia es mucho menos importante que para la temperatura del tratamiento (considerando la pirólisis lenta, es decir, excluyendo la carbonización instantánea de las consideraciones). Las tendencias se muestran con una flecha negra sólida. Los supuestos, indicados

por una flecha punteada negra, se basan en la evolución de la influencia de la temperatura (Weber y Quicker 2018).

Figura 1

Resumen de las tendencias en las propiedades de biocarbón en función de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia.



Nota: Extraído de Weber & Quicker, (2018)

2.2.2. Biocarbón de lodo digerido de PTAR

El biocarbón de lodos de depuradora se caracteriza por su alta densidad y fácil formación, que son importantes para el almacenamiento, el transporte y la aplicación práctica. Sin embargo, la pirólisis de los lodos digeridos de PTAR da como resultado un área superficial específica baja y una estructura de poro no desarrollada de biocarbón debido al contenido limitado de carbono en el lodo (Rozada et al., 2008). Según Wang et al., (2019) la superficie del biocarbón de lodos digeridos de PTAR es solo 24.72 m²/g cuando la temperatura de pirólisis era de 923°K. Esta propiedad es principalmente necesaria para los materiales adsorbentes.

2.2.3. Aguas ácidas

Según Schmiermund & Drozd, (1997) el término "drenaje ácido de mina" se utilizó originalmente para describir los efluentes resultantes de las operaciones de minería subterránea, que se caracterizaron por bajos valores de pH. Al respecto, más preocupante en relación con los efectos ambientales de los efluentes mineros puede no ser el bajo pH sino el alto contenido de metales pesados, sulfatos, sólidos en suspensión, etc.

También hicieron referencia a otra propuesta, el "drenaje de roca ácida" (DAR), que, sin embargo, se consideró válida solo en los casos en que la interacción del agua resulta en drenaje ácido en ausencia de minería, como en la situación informada en Antártida (Dold et al. 2013).

2.2.3.1. Características de efluentes ácidos

La calidad de efluentes ácidos puede caracterizarse por las propiedades físicas y químicas como la temperatura, la conductividad eléctrica y los sólidos suspendidos y disueltos. Como propiedades químicas significativas podemos citar pH, alcalinidad y acidez, dureza, iones metálicos en solución, contenido de sílice, contenido de sal, contenido de iones de amonio, contenido de hidrocarburos y radiactividad. Estos parámetros dependen de muchos factores, desde aquellos que

influyen en el proceso de oxidación de sulfuro, hasta aquellos que influyen en la migración y dilución. En el caso de las operaciones de extracción de metales, las características más comúnmente son pH, concentración de iones metálicos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.), concentraciones de aniones disueltos (sulfatos, nitratos, cloruros, arseniatos, etc.), dureza y sólidos en suspensión (Favas et al. 2016).

Para facilitar la caracterización de drenajes ácidos (y también la caracterización de aguas afectadas por drenajes ácidos), Schmiermund & Drozd, (1997) resumieron cinco características comunes de estas aguas: (1) pH, acidez y alcalinidad; (2) concentraciones de metales pesados; (3) concentraciones de Fe y Al; (4) concentraciones de sulfato y arseniato; y (5) turbidez y sólidos en suspensión.

2.2.3.2. Orígenes de los efluentes ácidos de mina

i. Mecanismos de la oxidación de pirita

Se acepta que el proceso natural de la meteorización de pirita no es solo químico sino biogeoquímico. Algunas especies de bacterias pueden actuar como catalizadores para aumentar la tasa de oxidación hasta 100 veces (Kelly et al., 2012).

Las reacciones involucradas en el proceso de disolución de pirita son bien conocidas y dan como resultado la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Ecuaciones 1, 2, 3 y 4), estimado en 2 moles de ácido por mol de pirita que a su vez crea condiciones solubilidad para el Fe (Chou et al., 2013).

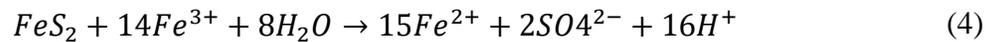
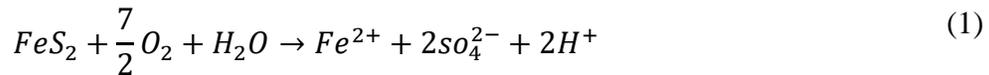
Por lo tanto, el modelo biogeoquímico se puede definir en tres pasos principales en la meteorización oxidativa de la pirita (Nordstrom et al., 2015), las cuales son las siguientes:

En la primera etapa, el pH es casi neutro y la tasa de oxidación de pirita causada por el oxígeno (mecanismo inorgánico) (ecuación (1)) y por acción microbiana, en particular por las especies *Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum*

ferrooxidans y Acidithiobacillus ferrooxidans (mecanismo biológico), es comparable. El proceso de oxidación es relativamente lento, incluso cuando la concentración de pirita es demasiado alta. La alcalinidad natural del agua a menudo es suficiente para neutralizar la acidez producida. Formación de hidróxido de hierro (ecuaciones (.2) y (3)), que incluye la hidrólisis del ión férrico, se procesa abióticamente, disminuyendo la velocidad de reacción con una disminución del pH. En este paso, el pH se mantiene aproximadamente por encima de 4.5, la concentración de sulfato es alta (a diferencia de la concentración de Fe) y la producción de acidez se reduce.

En la segunda etapa, cuando se excede la capacidad de neutralización del sistema, el ácido formado se acumula, causando una disminución del pH. En respuesta a esta acidificación, aumenta la capacidad oxidante de los microorganismos y disminuye la cantidad de pirita oxidada por el oxígeno. La oxidación de la pirita continúa como se describe en el primer paso, contrario a la oxidación del ion ferroso (ecuación (2)), cuya velocidad se controla principalmente por la actividad microbiana. La concentración de sulfato permanece alta y la concentración total de Fe aumenta con un aumento concurrente en la acidez. Fe^{3+} / Fe^{2+} es bajo y el pH del medio está aproximadamente entre 2.5 y 4.5.

En la tercera etapa, el pH en la vecindad de los granos de pirita es inferior a 3 y la tasa de producción de ácido varía debido a la mayor solubilidad del Fe, así como a la reducción de la precipitación de los óxidos e hidróxidos de Fe. La oxidación del ion ferroso está determinada únicamente por microorganismos, que influyen indirectamente en la oxidación de la pirita por el ion férrico (ecuación (4)). Por lo tanto, la actividad en estado estacionario del ión férrico está controlada por los efectos combinados de la oxidación bacteriana del ión ferroso, la reducción del ión férrico por pirita y la formación de sulfato de Fe e hidróxidos complejos. En este paso, el pH del medio es inferior a 2,5. La acidez y las concentraciones de sulfato y Fe total son altas, así como la relación Fe^{+3} / Fe^{+2}



ii. Meteorización de productos de sulfuro

La meteorización oxidativa de la pirita (y otros sulfuros) puede describirse utilizando una variedad de ecuaciones que, sin embargo, son representaciones aproximadas de un proceso natural complejo que refleja los siguientes resultados (Kim 2015; Seal y Shanks 2008):

- Solubilización de iones metálicos o su precipitación en formas estables e insolubles en condiciones superficiales (óxidos hidratados, carbonatos, sulfatos, arseniatos, fosfatos, silicatos y metales pesados); (
- Convertir el azufre en iones sulfato; y
- Producir soluciones ácidas.

2.2.3.3. Metales pesados

Se define como elementos de elevado peso atómico, tóxicos potenciales, que se utilizan en procesos industriales, tales como el cadmio (Cd), el plomo (Pb), el cobre (Cu), el níquel (Ni), el hierro (Fe), Zinc (Zn) y el mercurio (Hg) que, incluso en concentraciones bajas, pueden ser nocivos para los animales y las plantas (Barreiro y Roche, 2000).

Al corto plazo sus efectos tóxicos no se detectan fácilmente, aunque su incidencia puede presentarse a mediano y largo plazo. Los metales son difíciles de remover del ambiente, debido a que los propios organismos los incorporan a sus tejidos, y éstos a sus depredadores, ramificándose por la cadena trófica; tienen tendencia a formar asociaciones, con sustancias minerales (sulfatos, carbonatos, etc.) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de

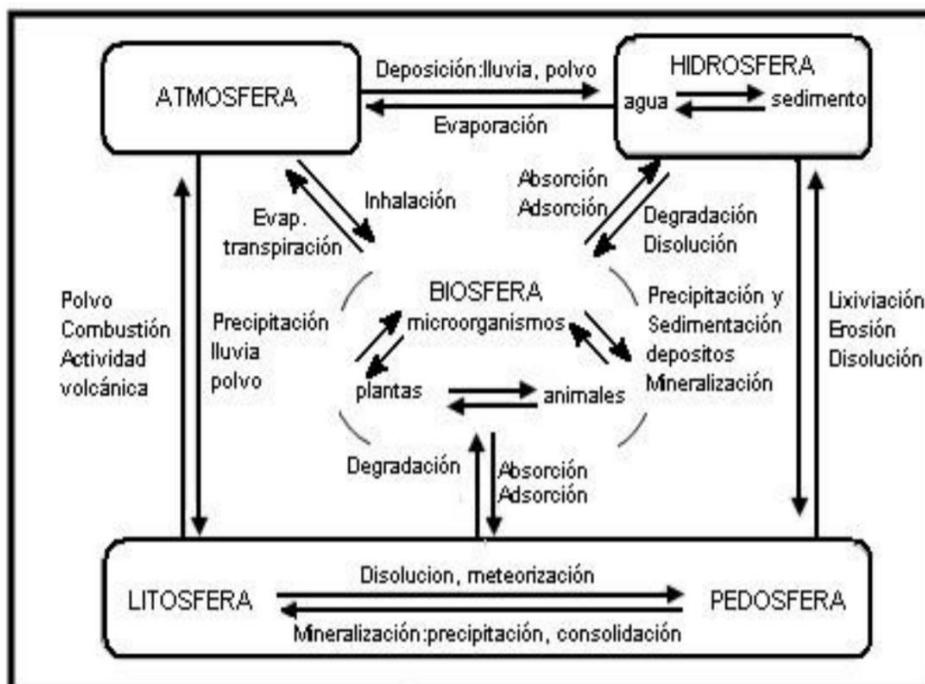
intercambio iónico, adsorción, etc., generando su acumulación en el medio ambiente, principalmente en los sedimentos de ríos, mares y lagos (Vilca Cabana 2018).

Además, si se emplea el criterio de densidad, se incorporarían bajo esta denominación a los metales que poseen una densidad mayor que $4,5 \text{ g/cm}^3$ ($4,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), pero los valores, según la bibliografía, pueden oscilar desde 4 g/cm^3 ($4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) hasta 7 g/cm^3 ($7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) (Rodríguez, 2017).

En realidad, como plantea Ruiz (2010), no existe una definición exacta para describir a los metales pesados; sin embargo, lo define como un conjunto de elementos, que abarca tanto compuestos metálicos como algunos semimetálicos e incluso no metálicos, se caracterizan por tener un nivel significativo de contaminación, toxicidad o ecotoxicidad.

Figura 2

Ciclo de Biogeoquímico de los Metales Pesados



Nota: Adaptado de Vilca, (2018)

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Biocarbón de lodos de PTAR

“Es un carbón vegetal que se obtiene a través de un proceso llamado pirólisis, donde un material de alimentación orgánico se calienta en un entorno limitado en oxígeno o libre de oxígeno a temperaturas entre 350 y 800°C (Krueger et al., 2020).”

“El biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 °C) y que es destinado a uso agrícola, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible y al carbón activado (Escalante Rebolledo et al. 2016)”

“El Biocarbón es denominado también como “Biochar”, en el idioma inglés. Esta palabra ha sido incluida recientemente, por lo que es una temática relativamente nueva. El Biocarbón hace referencia a un tipo de producto en forma de granos finos y porosos, de manera similar al carbón de origen vegetal (Romero Longwell 2017).”

“El biochar o biocarbón es un producto que se obtiene de la descomposición térmica de materiales orgánicos con o sin oxígeno, este proceso se le conoce como pirólisis y se realiza a temperaturas generalmente entre los 500 y 700 °C (García Bardales y Pérez Becerra 2019).”

“El biocarbón hace referencia a un tipo de producto en forma de granos finos y porosos, de manera similar al carbón de origen vegetal, es así, que el biocarbón de lodos es un producto que se puede obtener a base de lodos de piscicultura y PTAR como fuentes de fosfatos (Apeña y Castelo 2022)”.

2.3.2. Reducción de hierro y zinc.

“El zinc es un metal blanco azulado, el metal puro se disuelve muy lentamente en ácidos y álcalis, la presencia de impurezas o el contacto con platino o cobre, producidos por el agregado de unas gotas de las 13 soluciones de estos metales, acelera la reacción. (Vogel 1953)

“El hierro es un elemento abundante en la corteza terrestre, esencial para los organismos vivos. La importancia de este metal catiónico radica en las funciones que ejecuta como cofactor de varias enzimas importantes, componente activo de intermediarios de cadenas de transporte de electrones y componente esencial de proteínas con función de transporte.(Soriano Figueroa, 2018)”

“Son considerados metales pesados aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm³ cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos). (Navarro Aviñó et al, 2007)”.

“El hierro es uno de los elementos más abundantes que se puede encontrar en la corteza terrestre, está presente en corrientes naturales de agua en concentraciones que varían de 0.5 a 50 mg/L (Cisneros, 2001)”

2.4. Definición de términos básicos

Biocarbón.- Es un carbón vegetal como el material que se obtiene a través de un proceso llamado pirólisis, donde un material de alimentación orgánico se calienta en un entorno limitado en oxígeno o libre de oxígeno a temperaturas entre 350 y 800°C (Krueger et al., 2020).

Lodos digeridos de PTAR.- Los lodos digeridos de PTAR son una mezcla compleja heterogénea que consiste principalmente en fibras, residuos de animales y plantas, microorganismos, patógenos, parásitos y metales pesados (Xikai et al., 2019).

Efluentes ácidos de mina.- Son los efluentes resultantes de las operaciones de minería subterránea, que se caracterizaron por bajos valores de pH (Schmiermund y Drozd 1997).

Metales pesados. - Son tóxicos ambientales muy peligrosos. Sus propiedades más comunes son: persistencia, biotransformación, bioacumulación y elevada toxicidad, lo que produce que se encuentren en los ecosistemas por largos periodos, debido a que su degradación natural es difícil (Rodríguez, 2017).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis General

El biocarbón de lodo de PTAR tendrá una significativa reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

Hipótesis Específicas

- La dosis de biocarbón de lodo de PTAR tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.
- La temperatura de pirolisis tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.
- La concentración de metales pesados en el agua ácida influye en la reducción de Zinc y Hierro.

3.1.1. Operacionalización de las variables

Tabla 2

Operacionalización de las Variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	MÉTODO	TÉCNICA
INDEPENDIENTE <i>Biocarbón de lodo de PTAR</i>	<i>El biocarbón hace referencia a un tipo de producto en forma de granos finos y porosos, de manera similar al carbón de origen vegetal, es así, que el biocarbón de lodos es un producto que se puede obtener a base de lodos de piscicultura y PTAR como fuentes de fosfatos (Apeña y Castelo 2022).</i>	<i>Se elaboró biocarbón a partir de lodos de PTAR a distintos tipos de temperatura, la variación del tipo de biocarbón que se produce y los parámetros de operación.</i>	Parámetros de operación	Temperatura	350°C, 650°C		Observación experimental
				Dosis de biocarbón	10 g, 20g		
				Concentración	1/1(v/v), 1/10(v/v)		
DEPENDIENTE <i>Reducción de Zinc y Hierro</i>	<i>Los metales pesados pueden ser nocivos para los animales y las plantas (Barreiro & Roche, 2000). La aplicación del proceso de adsorción permite la reducción de estos metales pesados presente en las aguas ácidas</i>	<i>Se procedió a agitar a 200 rpm durante 4 horas en un Test-jar con vasos de 500 mL, con un tiempo de reposo de 5 min y se midió la concentración de zinc y hierro totales.</i>	Concentración	Concentración final de Zinc	mg/L	Método Hipotético deductivo	Observación experimental
				Concentración final de Hierro	mg/L		
				Eficiencia de reducción de Zinc	%		
				Eficiencia de reducción de Hierro	%		

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

La presente investigación es del tipo aplicada porque buscamos generar nuevo conocimiento relacionado a base de un conocimiento ya establecido en experimentos básicos. Es de diseño experimental, ya que se pretende manipular la variable independiente para observar sus efectos en la variable dependiente (Hernández et al., 2014), con enfoque cuantitativo y de nivel explicativo.

4.2. Método de investigación

El método aplicado será el Hipotético-deductivo que ayudó a alcanzar la información científica. Este método por medio de la observación del fenómeno, permite plantear las hipótesis para contrastar la veracidad de los enunciados realizando las pruebas experimentales (Behar 2008). Para demostrar las hipótesis se desarrollaron una serie de procedimientos como se describe a continuación.

4.2.1. Caracterización del agua acida de la laguna

Se realizó una caracterización de metales pesados a las muestras traídas de la laguna ácida. Esta caracterización permitió trazar una línea base para la evaluación del tratamiento en la reducción de estos metales.

4.2.2. Obtención de lodo de PTAR

Los lodos de PTAR fueron recolectados en la PTAR aerobia de San Antonio de Carapongo ubicado en el distrito de Ate.

4.2.3. Preparación del biocarbón

Para la floculación/coagulación, cabe la necesidad de generar biocarbón en bajas cantidades a partir de los lodos de PTAR. La obtención de biocarbón se realizó en un horno de pirólisis automatizado con una velocidad de 10°C/min. El método de producción a seguir fue el siguiente:

- El lodo de PTAR se secó a condiciones ambientales y luego se secó durante 9 horas en un secador convectivo a una temperatura de 70°C.
- Luego del secado se introdujo al reactor de pirólisis y se procedió a calentar de acuerdo al diseño experimental.
- El enfriamiento del biocarbón se realizó en 2 horas posterior a la pirólisis.
- Se molió y tamizó en una malla 250°.

4.2.4. Caracterización del Biocarbón

Se realizó un análisis de espectroscopia infrarroja FT-IR de los biocarbones obtenidos a 350°C y a 650°C. Esta caracterización permitió trazar una línea base para la evaluación en la reducción del zinc y hierro.

4.2.5. Procedimiento hierro

Se programó el equipo espectrofotómetro DR 1900 para la función de las lecturas del parámetro de Hierro.

Se preparó el blanco en una celda de vidrio con 10 mL de nuestra muestra, limpiamos la celda con papel tissue, luego insertamos la celda en el espectrofotómetro DR 1900 y presionamos la opción Zero.

Se preparó la muestra en un recipiente cilindro graduado mezclador de 25 ml añadimos 20 ml de nuestra muestra y agregamos el reactivo Ferrover, agitamos por 30 segundos luego iniciamos el temporizador del equipo de 3 minutos, finalizando el temporizador insertamos la celda limpiándolo antes bien con papel tissue para la lectura correspondiente.

NOTA: (Antes del análisis se ajusta el pH entre 3 y 5 con una solución de hidróxido de sodio 5N)

4.2.6. Procedimiento Zinc

Se programó el equipo espectrofotómetro DR 1900 para la función de las lecturas del parámetro de Zinc

Se preparó el blanco en una celda de vidrio con 10 ml de nuestra muestra y también un sobre del reactivo zinc, limpiamos la celda con papel tissue, luego insertamos la celda en el espectrofotómetro DR 1900 y presionamos la opción Zero.

Se preparó la muestra en un recipiente cilindro mezclador de 25 ml, añadimos 20 ml de nuestra muestra, agregamos el reactivo Zinc agitamos por 30 segundos, por último, agregamos 0.5 ml de ciclohexanona, agitamos por 30 segundos luego insertamos en una celda de vidrio de 10 ML limpiándolo bien antes con papel tissue para la lectura correspondiente.

4.2.7. Acondicionamiento del lugar a experimental

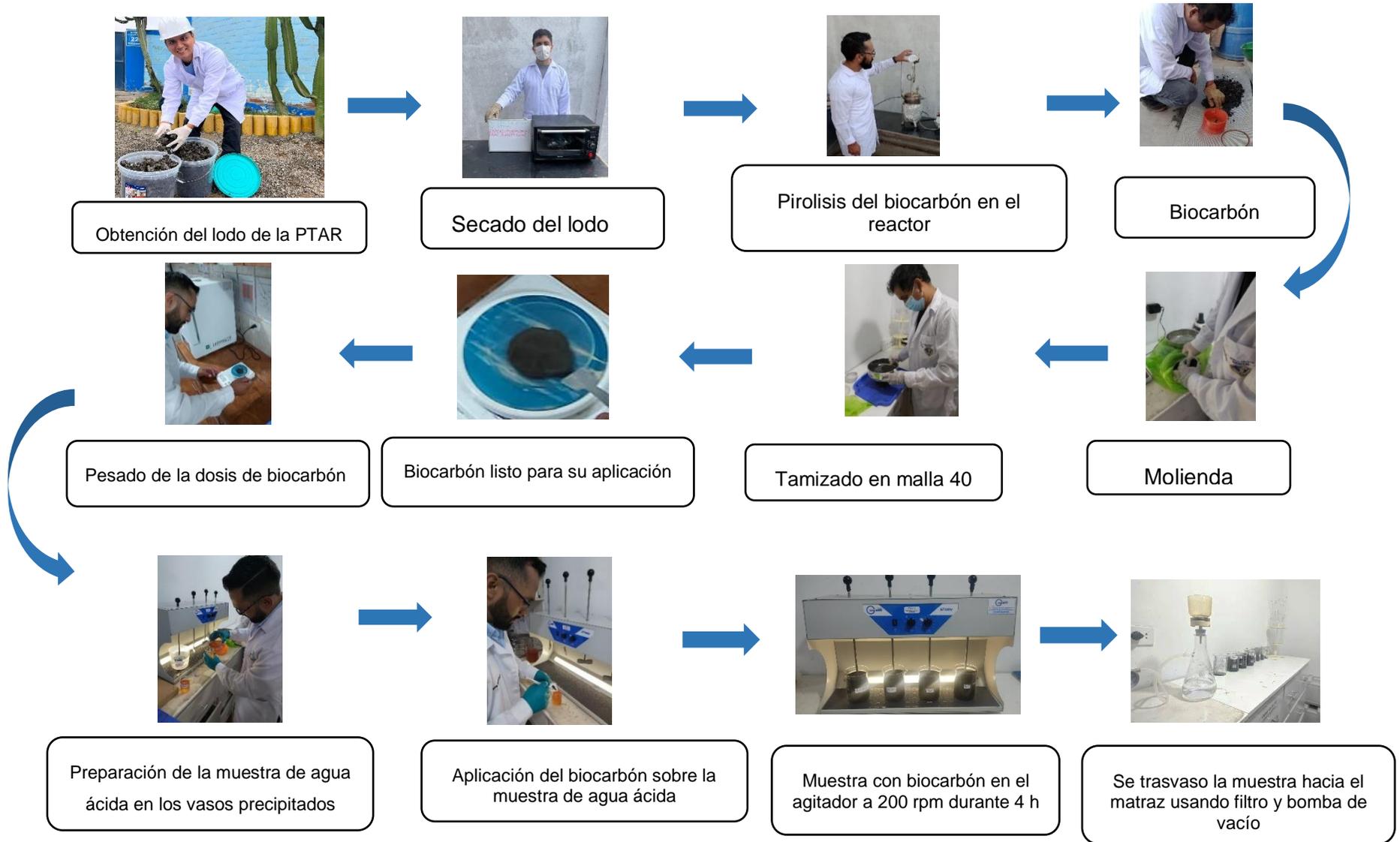
Se acondicionó el área donde se realizó la prueba de Test-Jar, se usaron vasos precipitados, agitador, matraz, mortero y pilón, tamiz malla 250°, balanza analítica, luna de reloj, cuchara espátula, papel Whatman 40, algodón y bomba de vacío.

4.2.8. Toma de muestra durante El Tes-Jar

Se realizaron las pruebas en un Tes-Jar a una velocidad de 200 rpm durante 4 horas. Luego de las pruebas de jarras, se dejó reposando 5 min. Luego de este tiempo se trasvasó la muestra tratada hacia el matraz usando el papel Whatman y la bomba de vacío. Finalmente se tomaron las muestras para el análisis de los metales pesados (Zinc y Hierro).

Figura 3

Diagrama de flujo del proceso de preparación y aplicación del biocarbón.



4.2.9. Diseño experimental

El diseño de experimentos es una de las metodologías más empleadas en la investigación. Se trata de la planificación de experimentos de manera que se obtengan datos apropiados para su posterior análisis mediante técnicas estadísticas. Esto conduce a la generación de conclusiones válidas y objetivas. En este proceso, se consideran aspectos como la realización de réplicas, la aleatorización y la formación de bloques. (Gárate, 2019). Esta investigación uso un diseño factorial.

2.2.3.4. Método de diseño factorial

Para esta investigación se usó un diseño factorial 2k con 3 factores (temperatura de biocarbón, dosis de biocarbón y concentración).

Tabla 3

Factores experimentales

Factores	Niveles	
	Mínimo (-1)	Máximo (+1)
Temperatura de biocarbón	350 °C	650 °C
Dosis de biocarbón	10 g	20 g
Concentración	1/1 (v/v)	1/10 (v/v)

El diseño experimental consideró 8 tratamientos con 3 repeticiones. Los detalles del diseño se presentan en la Tabla 4, el cual arrojó un total de 24 experimentos.

Tabla 4*Matriz experimental con el diseño factorial*

N°	Temperatura de biocarbón (°C)	Dosis de biocarbón (g)	Concentración (v/v)
1	350	10	1/1
2	350	10	1/10
3	350	20	1/1
4	350	20	1/10
5	650	10	1/1
6	650	10	1/10
7	650	20	1/1
8	650	20	1/10
9	350	10	1/1
10	350	10	1/10
11	350	20	1
12	350	20	1/10
13	650	10	1/1
14	650	10	1/10
15	650	20	1/1
16	650	20	1/10
17	350	10	1/1
18	350	10	1/10
19	350	20	1/1
20	350	20	1/10
21	650	10	1/1
22	650	10	1/10
23	650	20	1/1
24	650	20	1/10

Nota: Para el hierro se consideró 12 tratamientos adicionales en concentraciones de 1/100, los cuales se muestran en la tabla 6.

4.3. Población y muestra

Según Babbie, (2000), la unidad de análisis se refiere a "*la entidad que se selecciona para su estudio en un análisis particular*". Esta investigación seleccionó como la unidad de análisis a las "*Aguas acidas de laguna ácida Quiulacocha, Pasco, 2023*".

4.3.1. Población

La población está conformada por las aguas ácidas de la Laguna Quiulacocha de Pasco que está ubicada geográficamente 359391 Este, 8817108 Norte. Esta laguna contaminada tiene una superficie de 114 ha.

Muestreo

Para poder seleccionar la muestra se ha considera un muestreo No probabilístico. El tipo de muestreo no probabilístico es aquel en el que la selección de los participantes no se basa en una muestra aleatoria y en el que no todos los miembros de la población tienen las mismas posibilidades de ser seleccionados. En este tipo de muestreo, la selección de la muestra se realiza de forma intencional y con un criterio específico, por lo que no se pueden generalizar los resultados a toda la población.

De los tipos de muestreo no probabilísticos se ha consideró el muestreo por conveniencia. En este tipo de muestreo se seleccionan los objetos que están disponibles y dispuestos a participar en la investigación.

4.3.2. Muestra

De acuerdo al muestreo por conveniencia, la selección de una muestra de la laguna de Quiulacocha se lleva a cabo referente a la cantidad de agua ácida que se usaría para los ensayos de laboratorio. Para la selección de la cantidad de muestra se ha consideró los siguientes criterios de elegibilidad.

- El test-jar que se usó fue de 500 mL y las pruebas experimentales fueron 36, por lo tanto, se necesitó mínimamente 18 Litros de agua ácida.
- Se realizó pruebas preliminares para la validación de los equipos y el procedimiento experimental por lo que se necesitó 12 litros de agua ácida

De acuerdo a los criterios mencionados, la muestra recolectada fue en total 30L litros de agua ácida.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

Esta investigación se desarrolló en un laboratorio externo.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

En concordancia con lo descrito por Hernández Sampieri et al., (2014), la recolección de datos implica la elaboración de un plan de procedimientos que nos conduzcan a reunir datos con un propósito específico. En el presente capítulo se detallan las técnicas e instrumentos de recolección de información.

4.5.1. Técnica

Hernández et al., (2014) afirma que la observación involucra el registro sistemático, válido y fiable de los comportamientos o acciones que se manifiestan en el estudio. En consecuencia, se optó por utilizar la técnica de observación para evaluar cómo se comportan las variables y para detectar los cambios que se produzcan en las aguas ácidas de la laguna contaminada de Pasco después de someterlas a diferentes dosis de biocarbón.

4.5.2. Instrumentos de recolección de datos

La recolección se realizó mediante registro o fichas experimentales, que sirven como una guía para observar los cambios que se generaron en la variable dependiente de acuerdo con el diseño experimental.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para la estimación de los coeficientes para la función de respuesta del porcentaje de remoción de zinc y hierro en aguas acidas se utilizará el software estadístico SPSS. La significación de la ecuación del modelo estadístico, los parámetros individuales se evaluaron mediante el análisis de multivariante de la varianza (MANOVA, por sus siglas en inglés) en los intervalos de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). Se utilizará como estadístico el p-valor y se analizó el R^2 y R^2 ajustado.

Así también, se obtendrán gráficos de contorno bidimensionales (2D) para el modelo estadísticos.

4.7. Aspectos éticos de la investigación

La presente tesis cumple con el reglamento de propiedad intelectual (Res. 1206-2019-R) y el código de ética del investigador (Res. 260-2019-CU), respetando la propiedad intelectual de los autores que se mencionan como referencia.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Resultados de las características físico-químicos del agua contaminada simulada

En la Tabla 5 se presentan las características fisicoquímicas del agua ácida muestreada, entre ellas tenemos al nivel de pH, la turbidez de agua ácida muestreada, la conductividad, la DQO, el hierro total, el zinc total y los sulfatos. La concentración de Hierro se encontró con mayor presencia en una concentración de 1950 mg/L del agua muestreada, mientras que el zinc se encontraba a una concentración de 81 mg/L.

Tabla 5

Caracterización físico-química del agua ácida de la laguna Quiulacocha

Parámetro	Unidad	Valor
pH	unidad de pH	1.74
Turbidez	NTU	23.07
Conductividad	μS/cm	1625.00
DQO	mg/L	530.00
Fe Total	mg/L	1950
Zn Total	mg/L	81
Sulfatos	mg/L	6260.60

5.1.2. Resultados de las características del biocarbón de lodos de PTAR a diferentes temperaturas

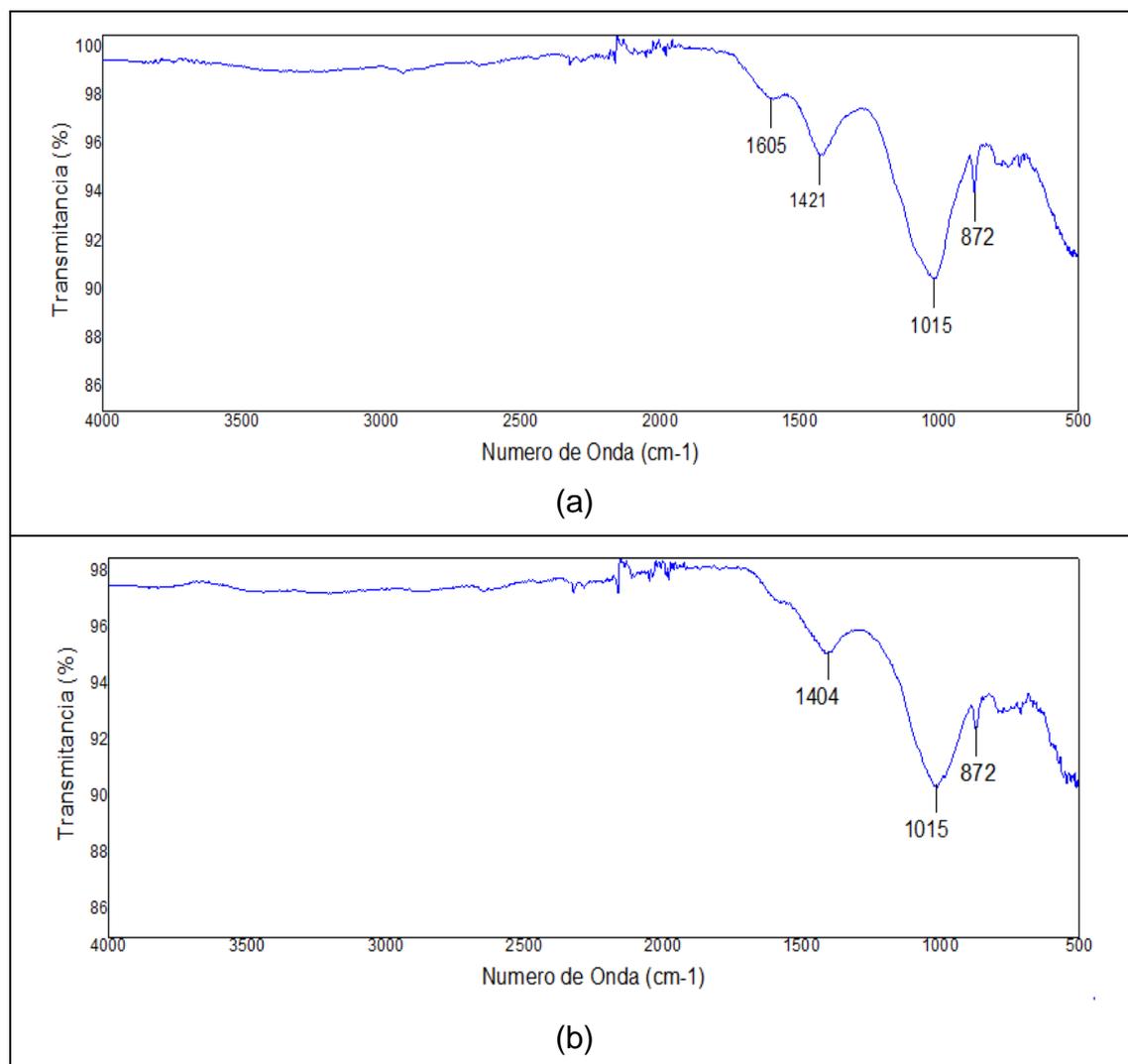
La producción de biocarbón de PTAR se llevó a cabo mediante un horno de pirólisis automatizado con temperatura de producción controlable. Se produjo un total de 2 Kilogramos de biocarbón de lodos de PTAR a 350°C y 650°C. La caracterización de los biocarbón de los lodos se realizó mediante el análisis de espectroscopia infrarroja FT-IR, esta metodología permite la medición de los grupos funcionales formados en el biocarbón.

En la Figura 5a y Figura 5b se muestra los espectros infrarrojos de Fourier de biocarbón (BC) de BC-PTAR-350°C (Figura 3a) y BC-PTAR-650°C (Figura

3b) muestras una mínima intensidad de grupos alcanos C-H a 2920 cm^{-1} , existe una diferencia significativa de los grupos carboxilos C-O-C a 1419.1 cm^{-1} , siendo el biocarbón de PTAR más intenso, por último, ambos presentan grupos éteres C-O-C a 1000.0 cm^{-1} . Existe mayor presencia de grupos alcanos y carboxilos en el BC-PTAR- $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto al BC-PTAR- $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 4

Espectros Infrarrojos FT-IR de los biocarbón de lodos de BC-PTAR- $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ y BC-PTAR- $650\text{ }^{\circ}\text{C}$



Nota. Lado Horizontal (Número de Onda cm^{-1})-Lado Vertical (Transmitancia)

5.1.3. Resultados experimentales del proceso de tratamiento

En la Tabla 6 se muestran los experimentos realizados en el proceso de tratamiento del agua ácida utilizando el biocarbón de lodo de PTAR como adsorbente de Hierro y Zinc de las aguas muestreadas.

Además, se observa los diferentes porcentajes de reducción de hierro y zinc al ser sometido a tres distintos tratamientos empleando tres factores y sus dos niveles. Los resultados obtenidos de acuerdo con el diseño experimental propuesto se detallan a continuación.

El biocarbón medido a 20 g de masa y expuesto a una temperatura de 650°C, en el tratamiento de la muestra directa se observó una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 172 mg/L (91.18%) y un máximo de 132 mg/L (93.23%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 12.4 mg/L (84.69%) y un máximo de 9.8 mg/L (87.90%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/10) se observó una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 49 mg/L (74.87%) y un máximo de 47 mg/L (75.90%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 0.6 mg/L (92.59%) y un máximo de 0.4 mg/L (95.06%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/100) se demostró una reducción del nivel de hierro en un mínimo de 1.6 mg/L (91.79%) y un máximo de 1.2 mg/L (93.85%).

Los resultados del tratamiento de biocarbón expuesto a 350°C y 20g de masa indicaron una reducción del nivel de hierro y zinc en los tres diferentes tratamientos. En el tratamiento a la muestra sin diluir se observó que el hierro se redujo en un mínimo de 260 mg/L (86.67%) y un máximo de 256 mg/L (86.87%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 32 mg/L (60.49%) y un máximo de 24 mg/L (70.37%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/10) se observa una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 109 mg/L (44.10%) y un máximo de 101 mg/L (48.21%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 2.8 mg/L (65.43%) y un máximo de 1.4 mg/L (82.72%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/100) se observó una reducción del nivel de hierro en un mínimo de 3.4 mg/L (82.56%) y un máximo de 2.3 mg/L (88.21%).

También se experimentó con el biocarbón medido a 10 g de masa y expuesto a una temperatura de 650°C y 350°C, en el tratamiento de la muestra, sin diluir, con biocarbón a 650°C se señala una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 213 mg/L (89.08%) y un máximo de 207 mg/L (89.38%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 35 mg/L (56.79%) y un máximo de 31 mg/L (61.73%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/10) se demostró una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 103 mg/L (47.18%) y un máximo de 91 mg/L (53.33%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 1.7 mg/L (79.01%) y un máximo de 1.2 mg/L (85.19%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/100) se demostró una reducción del nivel de hierro en un mínimo de 2.7 mg/L (86.15%) y un máximo de 1.9 mg/L (90.26%).

En el tratamiento de la muestra, sin diluir, con biocarbón a 350°C se observó una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 345 mg/L (82.31%) y un máximo de 318 mg/L (83.69%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 58 mg/L (28.40%) y un máximo de 55 mg/L (32.10%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/10) se observa una reducción del nivel de hierro y zinc. En el caso del hierro se redujo en un mínimo de 147 mg/L (24.62%) y un máximo de 142 mg/L (27.18%). Por otro lado, el zinc se redujo en un mínimo de 5.3 mg/L (34.57%) y un máximo de 4.8 mg/L (40.74%).

En el tratamiento de la muestra diluida (1/100) se demostró una reducción del nivel de hierro en un mínimo de 2.5 mg/L (87.18%) y un máximo de 1.8 mg/L (90.77%).

Tabla 6

Resultados de la matriz experimental con los diferentes tratamientos en la reducción de Hierro y Zinc

ZINC: 81mg/L HIERRO: 1950 mg/L		TRATAMIENTO 1 Muestra directa				TRATAMIENTO 2 Muestra diluida (1/10)				TRATAMIENTO 3 Muestra diluida* (1/100)						
Masa	Temperatura	HIERRO (mg/L)		HIERRO (%)		ZINC (mg/L)		ZINC (%)		HIERRO (mg/L)		HIERRO (%)				
		Inicial	Final			Inicial	Final			Inicial	Final					
20 g	Biochar: T= 650°C	1950	172	91,18	81	12,4	84,69	195	49	74,87	8,1	0,6	92,59	19,5	1,6	91,79
		1950	133	93,18	81	10,4	87,16	195	47	75,90	8,1	0,4	95,06	19,5	1,5	92,31
		1950	132	93,23	81	9,8	87,90	195	48	75,38	8,1	0,5	93,83	19,5	1,2	93,85
	Biochar: T= 350°C	1950	258	86,77	81	24	70,37	195	103	47,18	8,1	1,4	82,72	19,5	2,6	86,67
		1950	260	86,67	81	32	60,49	195	109	44,10	8,1	2,8	65,43	19,5	2,3	88,21
		1950	256	86,87	81	29	64,20	195	101	48,21	8,1	1,9	76,54	19,5	3,4	82,56
10 g	Biochar: T= 650°C	1950	207	89,38	81	35	56,79	195	91	53,33	8,1	1,2	85,19	19,5	2,7	86,15
		1950	213	89,08	81	32	60,49	195	103	47,18	8,1	1,5	81,48	19,5	1,9	90,26
		1950	210	89,23	81	31	61,73	195	100	48,72	8,1	1,7	79,01	19,5	2,3	88,21
	Biochar: T= 350°C	1950	325	83,33	81	55	32,10	195	143	26,67	8,1	5,3	34,57	19,5	2,2	88,72
		1950	318	83,69	81	58	28,40	195	147	24,62	8,1	4,8	40,74	19,5	1,8	90,77
		1950	345	82,31	81	57	29,63	195	142	27,18	8,1	5,1	37,04	19,5	2,5	87,18

Nota. *Solo aplicado al Hierro

La Tabla 7 presenta los resultados descriptivos de los experimentos para reducción de Hierro y Zinc. Se muestra que el promedio de reducción de Hierro de los tratamientos es 75.42% con una desviación estándar de 21.45%. Por otro parte el promedio de reducción de Zinc es 66.17% con una desviación estándar de 22.17%. El promedio la reducción de Hierro es mayor que la reducción de zinc con una menor desviación estándar.

Tabla 7

Resultado descriptivo de la reducción de Hierro y Zinc utilizando el biocarbón de lodos de PTAR como adsorbente

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
Reducción de Hierro (%)	36	24,62	93,85	75,41	21,450
Reducción de Zinc (%)	24	28,40	95,06	66,17	22,171

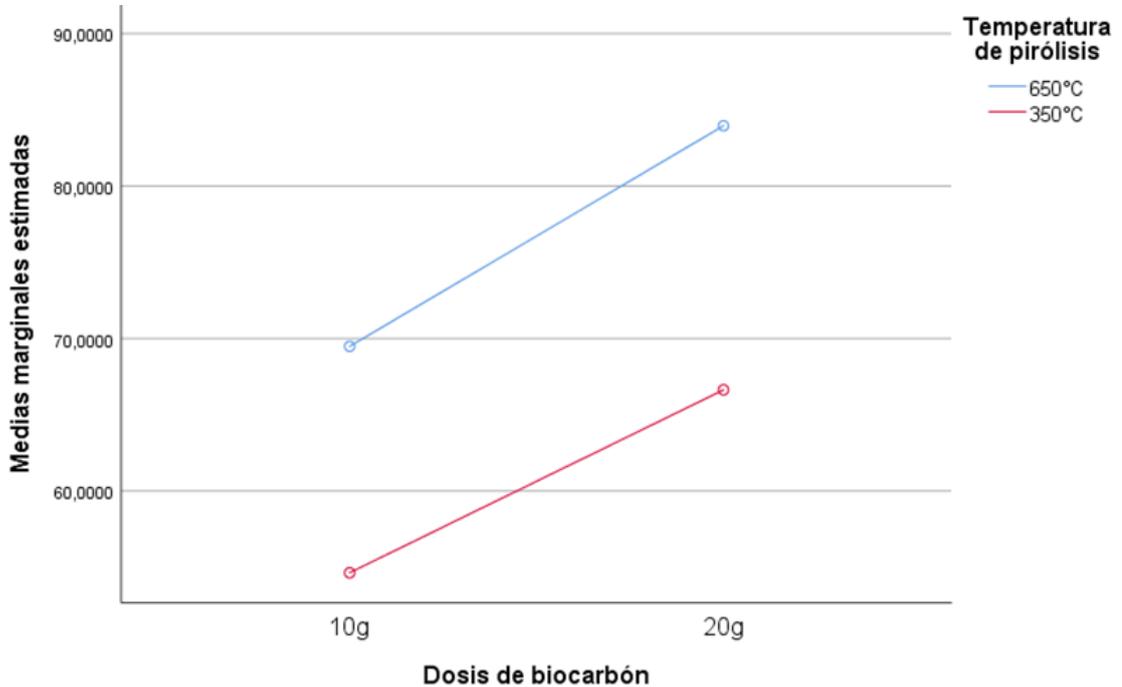
5.1.4. Efectos de los de los indicadores de estudio en la reducción de Hierro y Zinc

a. Reducción de Hierro

La Figura 5 muestra los efectos de los indicadores de estudio en la reducción de Hierro en el proceso de tratamiento de agua acida utilizando el biocarbón de lodo de PTAR. Según la Figura, existe una relación directa entre la cantidad de dosis de biocarbón y la reducción de Hierro, es decir a mayor cantidad de masa de biocarbón de lodo PTAR se reduce la concentración de Hierro en las muestras de agua acida. Teniendo más efectividad en reducción de Fe la dosis de biocarbón expuestas a mayor temperatura, siendo en el caso experimental 650°C

Figura 5.

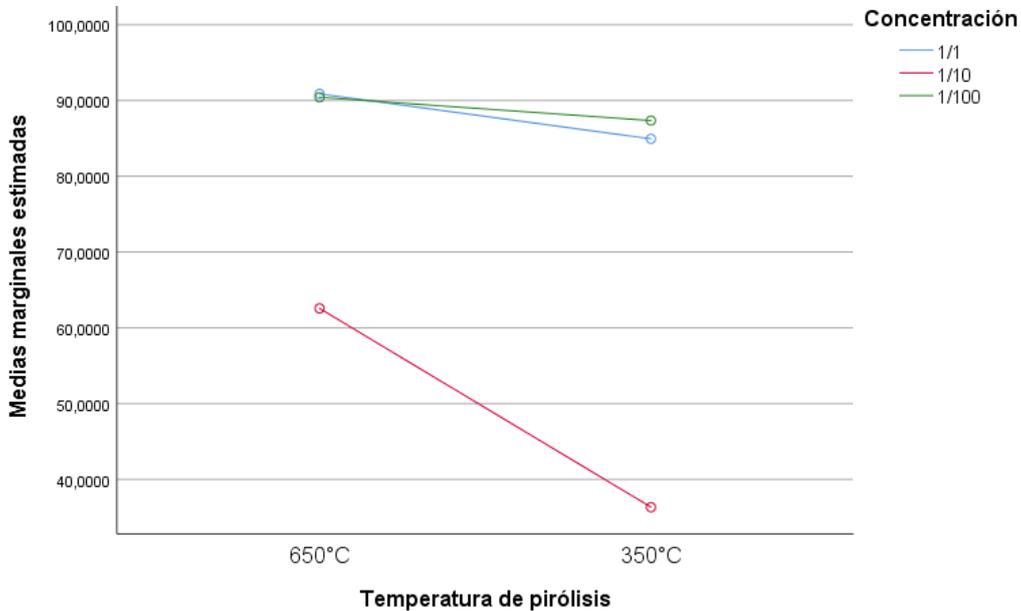
Efectos de la dosis de biocarbón y temperatura de pirólisis sobre la reducción de Hierro



En la Figura 6 se muestra los efectos de los indicadores temperatura de pirólisis y la concentración del agua ácida de la muestra en estudio. Según la figura, existe una relación directa entre el indicador temperatura de pirólisis y la reducción de hierro, es decir a mayor temperatura de biocarbón de lodo PTAR existe una mayor reducción de la concentración de hierro en las muestras de agua acida. De las 3 concentraciones (diluciones) desarrolladas para la remoción de Hierro se observa que la muestra con mayor efectividad en la reducción de hierro fue la concentración de 1/1 y 1/100, en consecuencia, existe una alta reducción de Hierro en las diferentes diluciones.

Figura 6

Efectos de la temperatura de pirólisis y la concentración sobre el % de reducción de Hierro

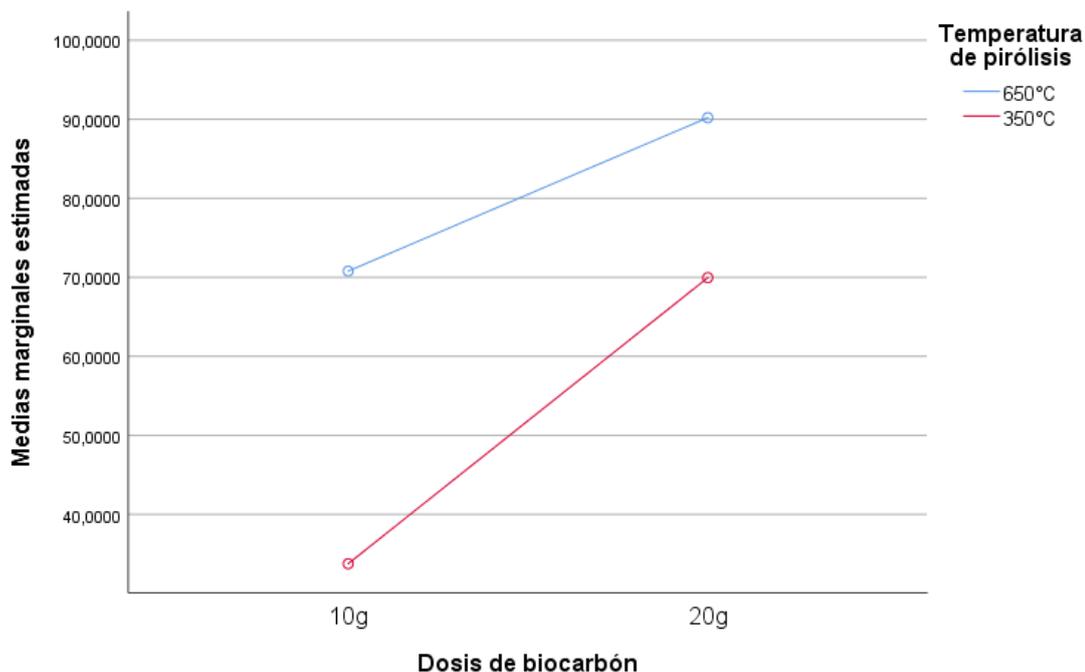


b. Reducción de Zinc

La Figura 7 muestra los efectos de los indicadores de estudio en la reducción de Zinc en el proceso de tratamiento de agua acida utilizando el biocarbón de lodo de PTAR. Según la figura, existe una relación directa entre la cantidad de dosis de biocarbón y la reducción de hierro, es decir a mayor cantidad de masa de biocarbón de lodo PTAR se reduce la concentración de zinc en las muestras de agua acida. Teniendo más efectividad en reducción de zinc la dosis de biocarbón expuestas a mayor temperatura, siendo en el caso experimental 650°C.

Figura 7

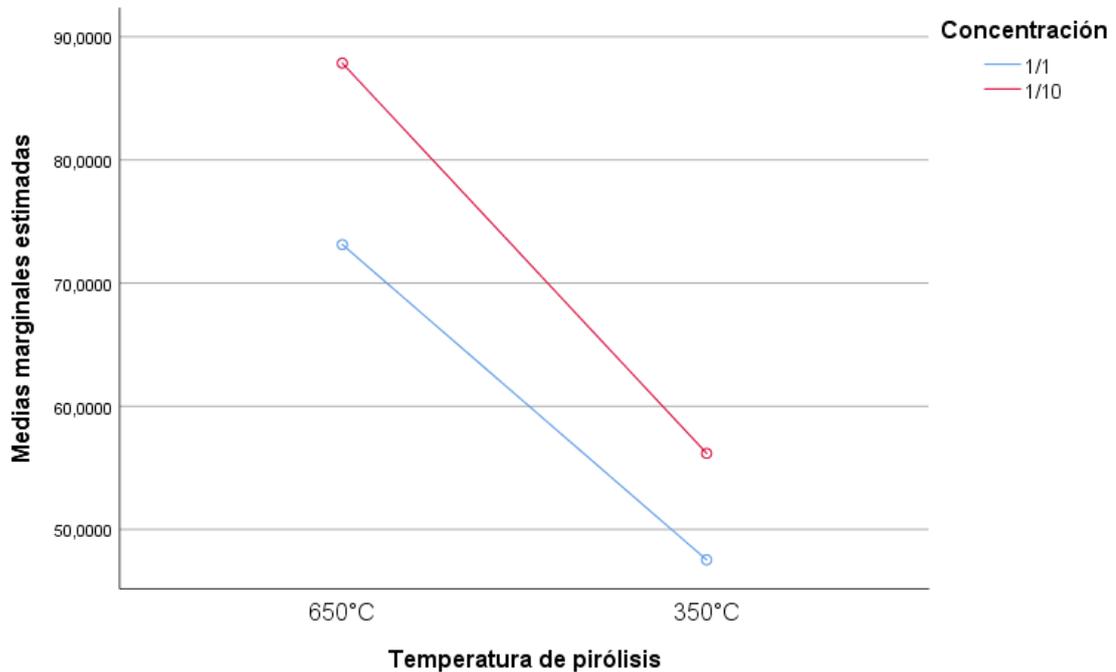
Efectos de la dosis de biocarbón y temperatura de pirólisis sobre el % de reducción de Zinc



En la Figura 8 se muestra los efectos de los indicadores temperatura de pirólisis y la concentración de la muestra en el estudio de la reducción de Zinc para el tratamiento de agua acida utilizando el biocarbón de lodo de PTAR. Según la figura, existe una relación directa entre el indicador temperatura de pirólisis y la reducción de Zn, es decir a mayor temperatura de biocarbón de lodo PTAR existe una mayor reducción la concentración de Zn en las muestras de agua ácida. Teniendo más efectividad en la reducción de Zn cuando la concentración es de 1/10, esperado por el factor dilución.

Figura 8

Efectos de la temperatura de pirólisis sobre % de reducción de zinc



5.2. Resultados Inferenciales

La prueba de normalidad se utiliza para determinar si una muestra de datos sigue una distribución normal o Gaussiana. La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana que es comúnmente encontrada en muchos fenómenos naturales y datos de muestra. Las pruebas de normalidad que se usó fue Shapiro-Wilk. Esta prueba compara los datos de muestra con la distribución normal esperada y generan un valor p que indica si hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. Un valor p bajo (generalmente por debajo de 0,05) sugiere que los datos no siguen una distribución normal.

5.2.1. Análisis de la normalidad

Se realizó la prueba de normalidad a los datos que comprenden los indicadores de la remoción de hierro y zinc, estos son dosis del biocarbón, temperatura de pirólisis y concentración de la muestra. Luego, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) con su respectiva significancia bilateral

La Tabla 8 muestra que, para la reducción de Hierro, el indicador de concentración de metales en la muestra sin diluir y la muestra diluida al (1/10) tienen una significancia mayor a 0.05. Es decir, para la reducción de Hierro el indicador de concentración de metales sigue una distribución normal.

Tabla 8

Normalidad de los indicadores de remoción del Hierro (Fe) y Zinc (Zn) y la concentración de metales

Concentración de metales		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Reducción de Hierro (%)	1/1	0,943	12	0,533
	1/10	0,880	12	0,087
Reducción de Zinc (%)	1/1	0,893	12	0,130
	1/10	0,836	12	0,025

Nota. *. Esto es un límite inferior de la significación verdadera; a. Corrección de significación de Lilliefors

Según se observa en la Tabla 9, el indicador de dosis de biocarbón en la reducción de Hierro no sigue una distribución normal. Sin embargo, en el caso de la reducción de Zinc, las dosis de 10g y 20g de biocarbón sí cumplen con la normalidad.

Tabla 9

Normalidad de los indicadores de reducción del Hierro (Fe) y el Zinc (Zn) y la Dosis de biocarbón

Masa de biocarbon		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Reducción de Hierro (%)	10g	0,824	12	0,018
	20g	0,815	12	0,014
Reducción de Zinc (%)	10g	0,880	12	0,087
	20g	0,911	12	0,222

La distribución normal para los indicadores de reducción de hierro y el efecto de la temperatura de pirólisis se muestra en la Tabla 10, donde para el indicador de temperatura de Pirólisis del efecto de reducción de hierro muestra que la temperatura de 650°C y 350°C no presentan una distribución normal, mientras que el indicador de temperatura de Pirólisis del efecto de reducción de Zinc en las muestras control 350°C de temperatura de biocarbón tienen una distribución normal con excepción de la temperatura de biocarbón a 650°C.

Tabla 10

Normalidad de los indicadores de reducción de Hierro (Fe) y Zinc (Zn) y la Temperatura de Pirólisis

Temperatura de pirólisis		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Reducción de Hierro (%)	650°C	0,814	12	0,014
	350°C	0,799	12	0,009
Reducción de Zinc (%)	650°C	0,853	12	0,040
	350°C	0,884	12	0,100

5.2.2. Análisis de la homogeneidad de varianza

Por otro lado, la prueba de varianza se utiliza para evaluar si las varianzas de diferentes grupos o muestras son iguales. Es especialmente útil cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos mediante pruebas como el análisis de la varianza (ANOVA). La prueba más común para la homogeneidad de varianzas es la prueba de Levene.

Se comparan las varianzas muestrales entre los indicadores de remoción del hierro y el zinc y se generó un valor p que indica si hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que las varianzas son iguales. Un valor p bajo sugiere que las varianzas difieren significativamente entre los grupos.

En la Tabla 11 se observa que los indicadores de remoción de Hierro y Zinc muestran para el indicador de dosis de biocarbón, el indicador temperatura de pirólisis y concentración poseen varianzas diferentes de acuerdo con los tratamientos, concluyendo que las varianzas de la media entre todos los grupos de tratamiento y los indicadores de remoción de Hierro y Zinc son diferentes.

Tabla 11*Prueba de homogeneidad de varianza de Levene para la Remoción de Hierro y Zinc*

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Reducción de Hierro (%)	Se basa en la media	5,126	7	16	0,003
	Se basa en la mediana	1,027	7	16	0,450
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,027	7	5,880	0,496
	Se basa en la media recortada	4,618	7	16	0,005
Reducción de Zinc (%)	Se basa en la media	2,453	7	16	0,065
	Se basa en la mediana	1,144	7	16	0,385
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,144	7	5,506	0,449
	Se basa en la media recortada	2,351	7	16	0,074

*Nota. Prueba la hipótesis nula de que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos; a Diseño: Intersección + Temp + Dos + Temp * Dos.*

5.2.3. Análisis Multivariado de la varianza (MANOVA)

Se ha desarrollado un análisis multivariante con 3 factores de estudio (Dosis de biocarbón, Temperatura de pirólisis y Concentración) que se basa en que la variabilidad total de la muestra puede descomponerse en la variabilidad debida a las diferencias entre grupos y la debida a las diferencias dentro de los grupos. La variabilidad es explicada por el efecto de pertenecer a un grupo, la cual se descompone en: la variabilidad debida a los efectos de cada una de las variables independientes (efectos principales) y la debida al efecto de todas las posibles interacciones que se producen entre ellas.

Para realizar el análisis de los efectos de los factores de estudio (factor temperatura de producción del biocarbón, factor dosificación del biocarbón, Temperatura de pirólisis y la Concentración), se usa el criterio multivariante para evaluar las diferencias entre los grupos (valorar las diferencias entre dimensiones de las variables dependientes o contrastar la hipótesis nula de igualdad de vectores de medias). En la Tabla 12 se muestran diferentes criterios que permiten evaluar el efecto que se asocia principalmente con la variable dependiente, la existencia de una fuerte correlación entre las variables dependientes o el efecto tiene una contribución insignificante al modelo para los indicadores de remoción de hierro y zinc, respectivamente

Para la evaluación de los criterios se comparó la Raíz mayor de Roy que solo explica la varianza de una función discriminante en comparación que lo criterios de Traza de Pillai, Lambda de Wilks y Traza de Hotelling que explica la varianza de todos los factores. Para los indicadores de reducción de Hierro y Zinc (Tabla 12) se muestra que todos los factores presentan una la Raíz mayor de Roy significativa ($p < 0.05$) de igual manera que los criterios de Traza de Pillai, Lambda de Wilks y Traza de Hotelling. Estos criterios de significancia se dan en cada factor de estudios y sus interacciones, lo que predice que se puede generar un buen modelo de regresión lineal para evaluar el efecto entre cada factor y la variable respuesta.

Tabla 12*Prueba multivalente en diferentes tipos de modelos para el criterio de elegibilidad de la regresión lineal*

Efecto		Valor	F	gl de hipótesis	gl de error	Sig.	Parámetro sin centralidad
Intersección	Traza de Pillai	1,000	22731,132 ^b	2,000	15,000	0,000	45462,263
	Lambda de Wilks	0,000	22731,132 ^b	2,000	15,000	0,000	45462,263
	Traza de Hotelling	3030,818	22731,132 ^b	2,000	15,000	0,000	45462,263
	Raíz mayor de Roy	3030,818	22731,132 ^b	2,000	15,000	0,000	45462,263
Dosis de biocarbón	Traza de Pillai	0,970	239,878 ^b	2,000	15,000	0,000	479,756
	Lambda de Wilks	0,030	239,878 ^b	2,000	15,000	0,000	479,756
	Traza de Hotelling	31,984	239,878 ^b	2,000	15,000	0,000	479,756
	Raíz mayor de Roy	31,984	239,878 ^b	2,000	15,000	0,000	479,756
Temperatura de pirólisis	Traza de Pillai	0,978	328,415 ^b	2,000	15,000	0,000	656,831
	Lambda de Wilks	0,022	328,415 ^b	2,000	15,000	0,000	656,831
	Traza de Hotelling	43,789	328,415 ^b	2,000	15,000	0,000	656,831
	Raíz mayor de Roy	43,789	328,415 ^b	2,000	15,000	0,000	656,831
Concentración	Traza de Pillai	0,997	2440,960 ^b	2,000	15,000	0,000	4881,920
	Lambda de Wilks	0,003	2440,960 ^b	2,000	15,000	0,000	4881,920
	Traza de Hotelling	325,461	2440,960 ^b	2,000	15,000	0,000	4881,920
	Raíz mayor de Roy	325,461	2440,960 ^b	2,000	15,000	0,000	4881,920
Dosis de biocarbón*	Traza de Pillai	0,744	21,828 ^b	2,000	15,000	0,000	43,657
Temperatura de pirólisis	Lambda de Wilks	0,256	21,828 ^b	2,000	15,000	0,000	43,657
	Traza de Hotelling	2,910	21,828 ^b	2,000	15,000	0,000	43,657
	Raíz mayor de Roy	2,910	21,828 ^b	2,000	15,000	0,000	43,657
Dosis de biocarbón *	Traza de Pillai	0,955	157,976 ^b	2,000	15,000	0,000	315,952
Concentración	Lambda de Wilks	0,045	157,976 ^b	2,000	15,000	0,000	315,952

Efecto		Valor	F	gl de hipótesis	gl de error	Sig.	Parámetro sin centralidad
	Traza de Hotelling	21,063	157,976 ^b	2,000	15,000	0,000	315,952
	Raíz mayor de Roy	21,063	157,976 ^b	2,000	15,000	0,000	315,952
Temperatura de pirólisis *	Traza de Pillai	0,949	139,570 ^b	2,000	15,000	0,000	279,139
	Lambda de Wilks	0,051	139,570 ^b	2,000	15,000	0,000	279,139
Concentración	Traza de Hotelling	18,609	139,570 ^b	2,000	15,000	0,000	279,139
	Raíz mayor de Roy	18,609	139,570 ^b	2,000	15,000	0,000	279,139
Dosis de biocarbón*	Traza de Pillai	0,569	9,896 ^b	2,000	15,000	0,002	19,793
Temperatura de pirólisis	Lambda de Wilks	0,431	9,896 ^b	2,000	15,000	0,002	19,793
	Traza de Hotelling	1,320	9,896 ^b	2,000	15,000	0,002	19,793
*Concentración	Raíz mayor de Roy	1,320	9,896 ^b	2,000	15,000	0,002	19,793

Nota. a. Diseño: Intersección + Temp + Dos + Temp * Dos; b. Estadístico exacto; c. Se ha calculado utilizando alpha = 0.05

El análisis de varianza multivariado (MANOVA), busca determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los grupos en términos de las variables dependientes consideradas en su conjunto, teniendo en cuenta la correlación entre ellas. La idea principal es evaluar si las medias de las variables dependientes difieren entre los grupos y si esta diferencia es estadísticamente significativa.

De acuerdo a los criterios de significancia cumplida de Raíz mayor de Roy se da las condiciones para el desarrollo de un modelo lineal con un $R^2= 0.997$ (R^2 ajustado= 0.996) aun 95% de confianza.

En la Tabla 13 se muestran el análisis multivariado de varianza (MANOVA) para los efectos simples (factor dosificación del biocarbón, Temperatura de pirólisis y la Concentración) y sus interacciones. Se muestra que para la reducción de Hierro y Zinc los factores como dosificación del biocarbón, Temperatura de pirólisis y la Concentración de metales tienen un alto grado de valor de F-value y tienen una significancia con $p<0.05$ mostrando un efecto significativo en la remoción de Zinc y Hierro.

Para la interacción de factores como Dosis de biocarbón- Temperatura de pirólisis solo muestra un efecto significativo para la reducción de Zinc, la interacción Dosis de biocarbón-Concentración solo se muestra un efecto significativo para reducción de Hierro y para la interacción Temperatura de Pirólisis- concentración de metales solo muestra un efecto de significancia para la reducción de Hierro.

De igual forma la Tabla 13, Para la interacción de factores como La interacción Dosis de biocarbón- Temperatura de pirólisis- Concentración de metales tiene un efecto significativo para la reducción Hierro y Zinc.

Tabla 13*MANOVA de los diferentes indicadores de la remoción de Hierro y Zinc*

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo	Reducción de Hierro (%)	7	1813,056	770,369	0,000
	Reducción de Zinc (%)	7	1576,509	93,081	0,000
Intersección	Reducción de Hierro (%)	1	113198,376	48098,057	0,000
	Reducción de Zinc (%)	1	105092,518	6204,936	0,000
Dosis de biocarbón	Reducción de Hierro (%)	1	1050,991	446,567	0,000
	Reducción de Zinc (%)	1	4642,880	274,128	0,000
Temperatura de pirólisis	Reducción de Hierro (%)	1	1553,007	659,874	0,000
	Reducción de Zinc (%)	1	4921,784	290,595	0,000
Concentración	Reducción de Hierro (%)	1	8877,337	3771,986	0,000
	Reducción de Zinc (%)	1	819,586	48,390	0,000
Dosis de biocarbón * Temperatura de pirólisis	Reducción de Hierro (%)	1	9,151	3,888	0,066
	Reducción de Zinc (%)	1	422,772	24,962	0,000
Dosis de biocarbón * Concentración	Reducción de Hierro (%)	1	570,960	242,601	0,000
	Reducción de Zinc (%)	1	58,688	3,465	0,081
Temperatura de pirólisis * Concentración	Reducción de Hierro (%)	1	617,932	262,560	0,000
	Reducción de Zinc (%)	1	55,663	3,286	0,089
Dosis de biocarbón * Temperatura de pirólisis * Concentración	Reducción de Hierro (%)	1	12,013	5,104	0,038
	Reducción de Zinc (%)	1	114,188	6,742	0,019
Error	Reducción de Hierro (%)	16	2,353		
	Reducción de Zinc (%)	16	16,937		
Total	Reducción de Hierro (%)	24			
	Reducción de Zinc (%)	24			

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Total corregido	Reducción de Hierro (%)	12729,048	23		
	Reducción de Zinc (%)	11306,551	23		

Nota. $R^2 = 0.997$ (R^2 ajustado = 0.996). Se ha calculado utilizando $\alpha = 0.05$

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Las pruebas de hipótesis se discutirán en función de los datos obtenidos en los resultados del análisis multivariado MANOVA, para ello, según el criterio de selección, se acepta la Hipótesis Nula (H_0) y se rechaza la Hipótesis alternativa (H_1) cuando el valor de significancia sea menor a 0.05.

6.1.1. Contrastación con hipótesis específicas

a. Hipótesis específica 1

H_0 : La dosis de biocarbón de lodo de PTAR no tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.

H_1 : La dosis de biocarbón de lodo de PTAR tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.

Según la Tabla 13 se muestra el análisis MANOVA (análisis de multivariado de la varianza) como indicador dosis de biocarbón tiene un efecto significativo sobre la reducción de Hierro y Zinc, ya que el p-value es menor a p (0.0000) <0.05 con un intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$); así mismo en su interacción con la temperatura de pirólisis se muestra una significancia solo en la reducción de Zinc, con la concentración de metales solo en la reducción de hierro. Sin embargo, en la interacción de la dosis de biocarbón-Temperatura de pirólisis-concentración de metales se muestra un efecto significativo en la reducción de hierro y zinc.

Por lo tanto, **se rechaza la Hipótesis Nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa(H_1)** confirmando la hipótesis planteada.

b. Hipótesis específica 2

H_0 : La temperatura de pirolisis no tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.

H_1 : La temperatura de pirolisis tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.

Según la Tabla 13, se muestra el análisis MANOVA (análisis de multivariado de la varianza) como indicador Temperatura de pirólisis tiene un efecto significativo sobre la reducción de Hierro y Zinc, ya que el p-value es menor a $p (0.0000) < 0.05$ con un intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$); así mismo en su interacción con la dosis de biocarbón se muestra un efecto de significativo solo en la reducción de Zinc, con la concentración de metales solo en la reducción de hierro. Sin embargo, en la interacción de la dosis de biocarbón-Temperatura de pirólisis-concentración de metales se muestra un efecto significativo en la reducción de hierro y zinc.

Por lo tanto, **se rechaza la Hipótesis Nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa(H_1)** confirmando que la temperatura de pirólisis tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.

c. Hipótesis específica 3

H_0 : La concentración de metales pesados en el agua ácida no influye en la reducción de Zinc y Hierro.

H_1 : La concentración de metales pesados en el agua ácida influye en la reducción de Zinc y Hierro.

Según la Tabla 13 se muestra el análisis MANOVA (análisis de multivariado de la varianza) como indicador Concentración de metales tiene un efecto significativo sobre la reducción de Hierro y Zinc, ya que el p-value es menor a $p (0.0000) < 0.05$ con un intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$); así mismo en su interacción con la dosis de biocarbón se muestra un efecto de significativo solo en la reducción de hierro, con la Temperatura de pirólisis solo en la reducción de hierro. Sin embargo, en la interacción de la dosis de biocarbón-Temperatura de pirólisis-concentración de metales se muestra un efecto significativo en la reducción de hierro y zinc.

Por lo tanto, **se rechaza la Hipótesis Nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa(H_1)** confirmando que la concentración de metales pesados en el agua ácida influye en la reducción de Zinc y Hierro

6.1.2. Contrastación con la hipótesis General

Según el método diseñado en la presente investigación se aplicó el método Hipotético-deductivo que ayudó a alcanzar la información científica. Este método por medio de la observación del fenómeno permite plantear las hipótesis para contrastar la veracidad de los enunciados realizando las pruebas experimentales (Behar 2008). Por lo tanto, se ha demostrado las 3 hipótesis por el método Hipotético-Deductivo y la lógica demuestra que el biocarbón de lodo de PTAR tendrá un significativo efecto en la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares

En su investigación, Ni et al., (2019) encontraron que el biochar derivado de lodo digerido anaeróbicamente mostró una adsorción competitiva de metales pesados, especialmente con Pb (II) teniendo mayor preferencia que Cd (II). En comparación con nuestros resultados, los indicadores (dosis, temperatura y concentración) que explican las condiciones en las que el biocarbón de PTAR remueve zinc y hierro, presentan un efecto significativo ($p < 0.05$).

La investigación de Van Poucke et al., (2019) muestra que el biocarbón generados por el pirólisis de tres materias primas: madera de pino, hierba y estiércol de vaca, bajo diversas condiciones. Las materias primas se pirolizaron a 2 temperaturas diferentes (350 °C y 550 °C) y 2 tiempos de residencia diferentes (10 y 60 min) y los biocarbón resultantes se evaluaron según su capacidad para inmovilizar Pb, Cu, Cd y Zn. El biocarbón producido a partir de estiércol de vaca y pirolizado a 550 ° C durante 10 min mostró la mejor sorción para todos los metales considerados. En comparación a nuestros resultados nuestra materia prima fue lodo PTAR que se pirolizaron a dos temperaturas diferentes (350 °C y 650 °C) también mostrando mejores resultados en la reducción de metales pesados como el Zn y Fe el pirolizado a 650 °C.

Con respecto a Tang et al., (2019) se pudo concluir que el rendimiento del biocarbón disminuyó con el aumento de la temperatura de pirólisis, y el biocarbón producido a 450 ° C (BC450) tuvo la mayor capacidad de eliminación de amonio

debido a su mayor área superficial y densidad de grupo funcional. En comparación con nuestro resultado, también se observó que la temperatura de pirólisis tiene un efecto significativo ($p < 0.05$) en la reducción de Fe y Zn, además de tener una relación directamente proporcional.

En la investigación de Santos, (2010), se evaluó la remoción de los metales pesados Cu y Zn en aguas residuales industriales mediante la biosorción de lodos activados de una PTAR. Se determinaron los parámetros que influyen en el proceso, como pH, capacidad de biosorción y tiempo de equilibrio. Se utilizaron lodos inactivados térmicamente, molidos y tamizados para las pruebas. Se emplearon matraces Erlenmeyer de 125 mL como reactores para la biosorción, donde se pusieron en contacto con el biosorbente y una solución metálica de Zn o Cu, y se agitaron durante un tiempo determinado. La concentración de metales se determinó mediante espectroscopia de absorción atómica. Se obtuvieron eficiencias de remoción del 98,73% para el Zn y del 67,97% para el Cu. En contraste con nuestra investigación el biocarbón medido a 20 g de masa y expuesto a una temperatura de 650°C, en el tratamiento de los distintos tratamientos, también, se observó una reducción del nivel de los metales pesados de hierro y zinc. En el caso del zinc se redujo en un máximo porcentaje del 87.90%.

Pulcha & Valencia, (2019) en su estudio evaluó la remoción de contaminantes en aguas residuales de mina mediante humedales artificiales, utilizando especies vegetales y materiales filtrantes, logrando reducir los niveles de zinc, plomo y cobre por debajo de los límites permitidos. Contrastando el estudio con nuestros resultados se demuestran que es posible reducir los niveles de contaminantes en aguas residuales utilizando diferentes métodos, uno con biocarbón de lodo y otro con humedales artificiales y materiales filtrantes, logrando reducir los niveles de zinc, plomo y cobre por debajo de los límites permitidos.

Lamadrid & Milián, (2016) en su tesis titulada “Uso comparativo de los métodos de ultrafiltración y floculación química para la remoción de metales presentes en el drenaje ácido de la unidad minera la cima”, en comparación con

los resultados de esta investigación, se muestran diferentes métodos para la remoción de metales en aguas residuales de mina. El estudio de Lamadrid y Milián utiliza ultrafiltración y floculación química, logrando altos porcentajes de remoción de Fe, Ni y Mg. Por otro lado, el estudio del biocarbón muestra reducciones significativas de hierro y zinc en diferentes concentraciones de muestra diluida.

De La Cruz Carpio, (2018) en su tesis titulada "*Eficiencia del biochar a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo a nivel laboratorio UCV, 2018*", en comparación con la presente investigación, se muestra que ambos estudios prueban la eficiencia de diferentes materiales para la inmovilización de contaminantes. El estudio de De La Cruz Carpio utiliza biocarbón generado a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo, logrando una eficiencia del 50.29%. Por otro lado, el estudio del biocarbón muestra reducciones significativas de hierro y zinc en diferentes concentraciones de muestra diluida. tuvo como objetivo la evaluación de la eficiencia de inmovilización del plomo en suelo mediante biocarbón generado de residuos de poda.

Ipanaque & Rocío, (2018), en su tesis titulada "Uso del biocarbón de excretas porcina y avícola en la reducción de cadmio en suelo agrícola contaminado, Huaral, 2018", investigaron el efecto del biocarbón proveniente de excretas porcina y avícola en la reducción de cadmio en suelo agrícola. Se realizaron cuatro tratamientos con dosificaciones de 0%, 5%, 10% y 15%, con tres repeticiones utilizando macetas como unidades experimentales para cada tipo de biocarbón. El biocarbón fue sometido a un proceso pirolítico a una temperatura promedio de 300°C. Los resultados mostraron que el tratamiento con una dosificación del 5% fue el más efectivo. En comparación con nuestros resultados, observamos que existe una relación directa entre la cantidad de dosis de biocarbón y la remoción de los metales en estudio, es decir a mayor cantidad de masa de biocarbón de lodo PTAR se reduce la concentración de Hierro y Zinc en las muestras de agua acida. Además, respecto a la temperatura de pirólisis, tuvo un mayor efecto de remoción de hierro y zinc aquellas dosis de biocarbón expuestas a mayor temperatura, siendo en el caso experimental 650°C

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

La presente tesis titulada “Biocarbón de lodo de PTAR para la reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023”, los tesistas señalan que se cumple fielmente con el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por RDU N° 260-2019-CU.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron, según la Figura 5 y 7, una relación directa entre la cantidad de dosis de biocarbón y el porcentaje de reducción de Hierro y Zinc. Es decir, a mayor cantidad de masa de biocarbón de lodo PTAR se reduce la concentración de Hierro y Zinc en las muestras de agua ácida. Además, según la Tabla 13, el factor dosis de biocarbón tiene un efecto significativo sobre la reducción de Hierro y Zinc, así mismo en su interacción con la temperatura de pirólisis se muestra una significancia solo en la reducción de Zinc, con la concentración de metales solo en la reducción de hierro. Sin embargo, en la interacción de la dosis de biocarbón-Temperatura de pirólisis-concentración de metales se muestra un efecto significativo en la reducción de hierro y zinc. Por lo tanto, se determinó que la dosis de 20g de biocarbón de lodo de PTAR permite una mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron, según la Figura 6 y 8, una relación directa entre el indicador temperatura de pirólisis y la reducción de Hierro y Zinc, es decir a mayor temperatura de biocarbón de lodo PTAR existe una mayor reducción de la concentración de Hierro y Zinc en las muestras de agua ácida. Además, Según la Tabla 13, el indicador Temperatura de pirólisis simple el biocarbón tiene un efecto significativo sobre la remoción de Hierro y Zinc, así mismo en su interacción con la dosis de biocarbón se muestra un efecto significativo solo en la reducción de Zinc, con la concentración de metales solo en la reducción de hierro. Sin embargo, en la interacción de la dosis de biocarbón-Temperatura de pirólisis-concentración de metales se observó un efecto significativo en la reducción tanto de hierro y como de zinc. Por lo tanto, se determinó que la temperatura de obtención del biocarbón de lodo de PTAR de 650°C permite una mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron, según la Tabla 6 y 8, de las 3 concentraciones (diluciones) desarrolladas para la evaluación de remoción de hierro y zinc se observa que existe un alto porcentaje de reducción de estos metales, siendo las concentraciones de 1/1 y 1/100, las que presentaron mayor efectividad en la remoción de hierro y zinc. Además, Según la Tabla 13, el indicador Concentración de metales tiene un efecto significativo sobre la reducción de Hierro y Zinc; así mismo en su interacción con la dosis de biocarbón se muestra un efecto de significativo solo en la reducción de hierro, con la Temperatura de pirólisis solo en la reducción de hierro. Sin embargo, en la interacción de la dosis de biocarbón-Temperatura de pirólisis-concentración de metales se muestra un efecto significativo en la reducción de hierro y zinc. Por lo tanto, en esta investigación se determinó que la concentración de metales pesados influye en la reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.

En esta investigación se evaluó si el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023. Se demostró, según la Tabla 6 que el biocarbón medido a 20g y 10g de masa y expuesto a una temperatura de 650°C y 350°C, en el tratamiento de las distintas muestras presento una reducción del nivel de hierro y zinc. Además, según la Tabla 13, los indicadores (dosis-Temperatura-Concentración) que explican las condiciones en que el biocarbón de PTAR permite la reducción de Zinc y hierro tienen un efecto significativo. Por ello, los resultados obtenidos en la presente investigación mostraron que el biocarbón de lodo de PTAR permite una reducción significativa del hierro y zinc del agua ácida de la laguna Quiulacocha, utilizando biocarbón de lodo de PTAR.

VIII. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda complementar la evaluación de metales totales empleando mayores dosis de biocarbón y aplicando diferentes tipos de sustratos fosfatados.

Para futuras investigaciones se recomienda complementar la evaluación empleando temperaturas de obtención de biocarbón entre 650°C y 800 °C.

Para futuras investigaciones se recomienda usar el biocarbón obtenido de la co-pirólisis de lodo de PTAR y biomasa lignocelulósica (obtenido de residuos orgánicos) debido a su mayor cantidad de carbono y evaluar su eficacia en la remoción de metales pesados.

En base a los resultados se recomienda a los gobiernos locales o privados, el uso del biocarbón de lodo de PTAR a mayor escala de aplicación combinado con otros métodos de remediación.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APEÑA MILLA, D.E. y CASTELO VEGA, S.A., 2022. Biocarbon de lodos para la inmovilización del plomo en suelos del AA. HH. Virgen de Guadalupe, Mi Perú, 2022.

BABBIE, E., 2000. Fundamentos de la investigación social. ,

BARREIRO, A.M.C. y ROCHE, L.A., 2000. *Diccionario de términos ambientales*. S.I.: Centro Félix Varela. ISBN 9597071169.

BARRY, D., BARBIERO, C., BRIENS, C. y BERRUTI, F., 2019. Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, vol. 122, pp. 472-480. ISSN 0961-9534.

BEHAR, D., 2008. *Introducción a la metodología de la investigación*. sf: Edición: A. 2008. S.I.: Rubeira.

BEJARANO RODRIGUEZ, J.J. y ESTACIO OCAS, M.N., 2019. Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo combinado con humedal en la mina Michiquillay-Encañada, 2019. ,

BREWER, C.E., SCHMIDT- ROHR, K., SATRIO, J.A. y BROWN, R.C., 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 386-396. ISSN 1944-7450.

CALLEGARI, A. y CAPODAGLIO, A.G., 2018. Properties and beneficial uses of (bio) chars, with special attention to products from sewage sludge pyrolysis. *Resources*, vol. 7, no. 1, pp. 20.

CHOU, I.-M., SEAL II, R.R. y WANG, A., 2013. The stability of sulfate and hydrated sulfate minerals near ambient conditions and their significance in environmental and planetary sciences. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 62, pp. 734-758. ISSN 1367-9120.

CISNEROS, B.E.J., 2001. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos*

y tecnología apropiada. S.I.: Colegio de Ingenieros Ambientales de México. ISBN 968186042X.

DE LA CRUZ CARPIO, L., 2018. Eficiencia del biochar a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo a nivel laboratorio UCV, 2018. ,

DOLD, B., GONZALEZ-TORIL, E., AGUILERA, A., LOPEZ-PAMO, E., CISTERNAS, M.E., BUCCHI, F. y AMILS, R., 2013. Acid rock drainage and rock weathering in Antarctica: important sources for iron cycling in the Southern Ocean. *Environmental science & technology*, vol. 47, no. 12, pp. 6129-6136. ISSN 0013-936X.

ESCALANTE REBOLLEDO, A., PÉREZ LÓPEZ, G., HIDALGO MORENO, C., LÓPEZ COLLADO, J., CAMPO ALVES, J., VALTIERRA PACHECO, E. y ETCHEVERS BARRA, J.D., 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, vol. 34, no. 3, pp. 367-382. ISSN 0187-5779.

FAN, J., LI, Yan, YU, H., LI, Yuxuan, YUAN, Q., XIAO, H., LI, F. y PAN, B., 2020. Using sewage sludge with high ash content for biochar production and Cu(II) sorption. *Science of The Total Environment*, vol. 713, pp. 136663. ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136663.

FAVAS, P.J.C., SARKAR, S.K., RAKSHIT, D., VENKATACHALAM, P. y PRASAD, M.N.V., 2016. Acid Mine Drainages From Abandoned Mines. *Environmental Materials and Waste*. S.I.: Elsevier, pp. 413-462.

GAO, P., SUN, X., XIAO, E., XU, Z., LI, B. y SUN, W., 2019. Characterization of iron-metabolizing communities in soils contaminated by acid mine drainage from an abandoned coal mine in Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 10, pp. 9585-9598. ISSN 1614-7499.

GÁRATE REYES, B.A., 2019. Optimización de un medio de producción de células neutroalcalinas para *Aspergillus fumigatus* mediante la metodología de superficies de respuesta. ,

GARCIA BARDALES, J.M. y PEREZ BECERRA, Y.L., 2019. *Eficiencia de diversas*

dosis de biochar elaborado con cáscara de naranja para la adsorción de plomo en suelos contaminados de la ribera del Rio Rímac-2019. S.I.: Universidad César Vallejo.

GODLEWSKA, P., SIATECKA, A., KOŃCZAK, M. y OLESZCZUK, P., 2019. Adsorption capacity of phenanthrene and pyrene to engineered carbon-based adsorbents produced from sewage sludge or sewage sludge-biomass mixture in various gaseous conditions. *Bioresource technology*, vol. 280, pp. 421-429. ISSN 0960-8524.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. del P., 2014. *Metodología de la investigación*, editorial Mcgraw Hill. 2014. S.I.: México, DF.

HOEKMAN, S.K., BROCH, A., ROBBINS, C., ZIELINSKA, B. y FELIX, L., 2013. Hydrothermal carbonization (HTC) of selected woody and herbaceous biomass feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 3, no. 2, pp. 113-126. ISSN 2190-6815.

HUANG, R., ZHANG, B., SAAD, E.M., INGALL, E.D. y TANG, Y., 2018. Speciation evolution of zinc and copper during pyrolysis and hydrothermal carbonization treatments of sewage sludges. *Water research*, vol. 132, pp. 260-269. ISSN 0043-1354.

IDASZKIN, Y.L., CAROL, E. y DEL PILAR, A.M., 2017. Mechanism of removal and retention of heavy metals from the acid mine drainage to coastal wetland in the Patagonian marsh. *Chemosphere*, vol. 183, pp. 361-370. ISSN 0045-6535.

IPANAQUE, R. y ROCÍO, S., 2018. Uso del biochar de excretas porcina y avícola en la reducción de cadmio en suelo agrícola contaminado, Huaral, 2018. ,

KAMBO, H.S. y DUTTA, A., 2015. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 359-378. ISSN 1364-0321.

KARIM, A.A., KUMAR, M., MOHAPATRA, S. y SINGH, S.K., 2019. Nutrient rich

biomass and effluent sludge wastes co-utilization for production of biochar fertilizer through different thermal treatments. *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, pp. 570-579. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.04.330.

KELLY, M., ALLISON, W.J., GARMAN, A.R. y SYMON, C.J., 2012. *Mining and the freshwater environment*. S.I.: Springer Science & Business Media. ISBN 9400913591.

KIM, Y., 2015. Mineral phases and mobility of trace metals in white aluminum precipitates found in acid mine drainage. *Chemosphere*, vol. 119, pp. 803-811. ISSN 0045-6535.

KRUEGER, B.C., FOWLER, G.D., TEMPLETON, M.R. y MOYA, B., 2020. Resource recovery and biochar characteristics from full-scale faecal sludge treatment and co-treatment with agricultural waste. *Water Research*, vol. 169, pp. 115253. ISSN 00431354. DOI 10.1016/j.watres.2019.115253.

LAMADRID, C., ESPERANZA, I. y MILIÁN GUTIÉRREZ, D.R.D., 2016. Uso comparativo de los Métodos de Ultrafiltración y Floculación Química para la remoción de metales presentes en el drenaje ácido de la Unidad Minera La Cima. ,

LEE, J., SARMAH, A.K. y KWON, E.E., 2019. Chapter 1 - Production and Formation of Biochar. En: Y.S. OK, D.C.W. TSANG, N. BOLAN y J.M.B.T.-B. from B. and W. NOVAK (eds.). S.I.: Elsevier, pp. 3-18. ISBN 978-0-12-811729-3.

LIU, W.-J., JIANG, H. y YU, H.-Q., 2015. Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material. *Chemical reviews*, vol. 115, no. 22, pp. 12251-12285. ISSN 0009-2665.

NAVARRO AVIÑÓ, J.P., I AGUILAR, A. y LÓPEZ MOYA, J.R., 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, vol. 16, no. 2. ISSN 1697-2473.

NI, B.-J., HUANG, Q.-S., WANG, C., NI, T.-Y., SUN, J. y WEI, W., 2019. Competitive adsorption of heavy metals in aqueous solution onto biochar derived from anaerobically digested sludge. *Chemosphere*, vol. 219, pp. 351-357. ISSN

00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.12.053.

NORDSTROM, D.K., BLOWES, D.W. y PTACEK, C.J., 2015. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, vol. 57, pp. 3-16. ISSN 0883-2927.

ORE NUÑEZ, E.C., 2021. Recuperación de Fe del drenaje ácido de mina de Quiulacocha (Pasco) para la obtención de goethita aplicable en el control ambiental.

,

PENIDO, E.S., MARTINS, G.C., MENDES, T.B.M., MELO, L.C.A., DO ROSÁRIO GUIMARÃES, I. y GUILHERME, L.R.G., 2019. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 172, pp. 326-333. ISSN 0147-6513.

PULCHA VILLALOBOS, J.R. y VALENCIA NARVA, P.M., 2019. Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales. ,

QUICKER, P. y WEBER, K., 2016. Biokohle. *Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten*. Wiesbaden,

ROBLES ZAMBRANO, A.E., 2019. *Evaluación de la estabilidad geoquímica de relaves sulfurados de Quiulacocha mediante el uso de cobertura biológica en medios no saturados con riego de efluentes domésticos a escala piloto-AMSAC-2018*. S.l.: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

RODRÍGUEZ HEREDIA, D., 2017. Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MediSan*, vol. 21, no. 12, pp. 3372-3385. ISSN 1029-3019.

ROMERO LONGWELL, J.R., 2017. Eficiencia en la Inmovilización de Plomo en el Suelo Mediante la Aplicación de Cantidades de Biocarbón en el Distrito San Mateo, Lima. ,

ROUSSET, P., MACEDO, L., COMMANDRÉ, J.-M. y MOREIRA, A., 2012. Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition

of the solid by-product. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 96, pp. 86-91. ISSN 0165-2370.

ROZADA, F., OTERO, M., MORÁN, A. y GARCÍA, A.I., 2008. Adsorption of heavy metals onto sewage sludge-derived materials. *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 14, pp. 6332-6338. ISSN 0960-8524.

RUIHUA, L., LIN, Z., TAO, T. y BO, L., 2011. Phosphorus removal performance of acid mine drainage from wastewater. *Journal of hazardous materials*, vol. 190, no. 1-3, pp. 669-676. ISSN 0304-3894.

RUIZ, A., 2010. Los metales pesados. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, pp. 63. ISSN 2173-0903.

SANTOS BONILLA, K.Á., 2010. Biosorción de metales pesados empleando lodos activados. ,

SCHMIERMUND, R.L. y DROZD, M.A., 1997. Acid mine drainage and other mining-influenced waters (MIW). *Mining Environmental Handbook: Effects of Mining on the Environment and American Environmental Controls on Mining*. S.I.: World Scientific, pp. 599-617.

SEAL, R.R. y SHANKS, W.C., 2008. Sulfide oxidation: insights from experimental, theoretical, stable isotope, and predictive studies in the field and laboratory. *Applied geochemistry*, vol. 23, no. 2. ISSN 0883-2927.

SHEN, Z., ZHANG, J., HOU, D., TSANG, D.C.W., OK, Y.S. y ALESSI, D.S., 2019. Synthesis of MgO-coated corncob biochar and its application in lead stabilization in a soil washing residue. *Environment international*, vol. 122, pp. 357-362. ISSN 0160-4120.

SORIANO FIGUEROA, R., 2018. *Evaluación de la eficiencia en neutralización y remoción de metales pesados (fe, cu, pb, zn) del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de Cía Minera Huancapeti-2016*. S.I.: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

SUN, W., WANG, H. y HOU, K., 2018. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas. *Journal of Cleaner Production*, vol. 171, pp. 567-579. ISSN 0959-6526.

TANG, Y., ALAM, M.S., KONHAUSER, K.O., ALESSI, D.S., XU, S., TIAN, W. y LIU, Y., 2019. Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater. *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 927-936. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.268.

UDAYANGA, W.D.C., VEKSHA, A., GIANNIS, A. y LIM, T.-T., 2019. Pyrolysis derived char from municipal and industrial sludge: Impact of organic decomposition and inorganic accumulation on the fuel characteristics of char. *Waste management*, vol. 83, pp. 131-141. ISSN 0956-053X.

VAN POUCKE, R., ALLAERT, S., OK, Y.S., PALA, M., RONSSE, F., TACK, F.M.G. y MEERS, E., 2019. Metal sorption by biochars: A trade-off between phosphate and carbonate concentration as governed by pyrolysis conditions. *Journal of Environmental Management*, vol. 246, pp. 496-504. ISSN 03014797. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.05.112.

VILCA CABANA, S.R., 2018. Recuperación de Cadmio y Zinc en la Unidad Minera El Cofre con el reactivo MPP50 por coagulación–floculación. ,

VOGEL, A.I., 1953. Química analítica cualitativa. ,

WANG, J., LIAO, Z., IFTHIKAR, J., SHI, L., CHEN, Zhuqi y CHEN, Zhulei, 2017. One-step preparation and application of magnetic sludge-derived biochar on acid orange 7 removal via both adsorption and persulfate based oxidation. *RSC advances*, vol. 7, no. 30, pp. 18696-18706.

WANG, Z., WANG, J., XIE, L., ZHU, H. y SHU, X., 2019. Influence of the addition of cotton stalk during co-pyrolysis with sewage sludge on the properties, surface characteristics, and ecological risks of biochars. *Journal of Thermal Science*, vol. 28, no. 4, pp. 755-762. ISSN 1003-2169.

- WEBER, K. y QUICKER, P., 2018. Properties of biochar. *Fuel*, vol. 217, pp. 240-261. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2017.12.054.
- XIKAI, M., LIXIONG, W., JIWEI, L., XIAOLI, Q. y TONGYAO, W., 2019. Comparison of regression models for estimation of carbon emissions during building's lifecycle using designing factors: a case study of residential buildings in Tianjin, China. *Energy and Buildings*, vol. 204, pp. 109519. ISSN 0378-7788.
- YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D.H. y ZHENG, C., 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, vol. 86, no. 12-13, pp. 1781-1788. ISSN 0016-2361.
- YANG, Q., WANG, X., LUO, W., SUN, J., XU, Q., CHEN, F., ZHAO, J., WANG, S., YAO, F. y WANG, D., 2018. Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge. *Bioresource technology*, vol. 247, pp. 537-544. ISSN 0960-8524.
- YIN, Q., ZHANG, B., WANG, R. y ZHAO, Z., 2017. Biochar as an adsorbent for inorganic nitrogen and phosphorus removal from water: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, no. 34, pp. 26297-26309. ISSN 0944-1344.
- ZHANG, H., ZHANG, S.-S., ZHU, L., LI, Y.-P. y CHEN, L., 2022. Phosphorus recovery in the alternating aerobic/anaerobic biofilm system: Performance and mechanism. *Science of The Total Environment*, vol. 810, pp. 152297. ISSN 0048-9697.
- ZHANG, P., XUE, B., JIAO, L., MENG, X., ZHANG, L., LI, B. y SUN, H., 2021. Preparation of ball-milled red phosphorus-loaded biochar and its highly effective remediation for Cd-and Pb-contaminated alkaline soil. *Science of The Total Environment*, pp. 152648. ISSN 0048-9697.

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	MÉTODO	TÉCNICA
<p>¿En qué medida el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>¿Cuál será la dosis de biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?</p> <p>¿Cuál será la temperatura de obtención del biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?</p> <p>¿Cuál será la concentración de metales pesados que influya la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023?</p>	<p>Evaluar si el biocarbón de lodo de PTAR permite la reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>Determinar la dosis de biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.</p> <p>Determinar la temperatura de obtención del biocarbón de lodo de PTAR que permita la mayor reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.</p> <p>Determinar que la concentración de metales pesados influye en la reducción de Zinc y Hierro de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.</p>	<p>El biocarbón de lodo de PTAR tendrá una significativa reducción de Zinc y Hierro en las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, Pasco, 2023.</p> <p>HIPOTESIS ESPECÍFICOS</p> <p>La dosis de biocarbón de lodo de PTAR tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.</p> <p>La temperatura de pirolisis tendrá un efecto significativo sobre la reducción de Zinc y Hierro.</p> <p>La concentración de metales pesados en el agua ácida influye en la reducción de Zinc y Hierro.</p>	<p><i>Biocarbón de lodo de PTAR</i></p>	<p><i>El biocarbón hace referencia a un tipo de producto en forma de granos finos y porosos, de manera similar al carbón de origen vegetal, es así, que el biocarbón de lodos es un producto que se puede obtener a base de lodos de piscicultura y PTAR como fuentes de fosfatos (Apeña y Castelo 2022).</i></p>	<p><i>Se elaboró biocarbón a partir de lodos de PTAR a distintos tipos de temperatura, la variación del tipo de biocarbón que se produce y los parámetros de operación.</i></p>	<p>Parámetros de operación</p>	<p><i>Temperatura</i></p>	<p>350 C°, 650 °C</p>	<p>Método Hipotético deductivo</p>	<p>Observación experimental</p>
							<p><i>Dosis de biocarbón</i></p>	<p>10 g, 20 g</p>		
							<p><i>Concentración</i></p>	<p>1/1 (v/v), 1/10 (v/v)</p>		
			<p><i>Reducción de Zinc y Hierro</i></p>	<p><i>Los metales pesados pueden ser nocivos para los animales y las plantas (Barreiro & Roche, 2000). La aplicación del proceso de adsorción permite la reducción de estos metales pesados presente en las aguas ácidas</i></p>	<p><i>Se procedió a agitar a 200 rpm durante 4 horas en un Test-jar con vasos de 500 mL, con un tiempo de reposo de 5 min y se midió la concentración de zinc y hierro totales.</i></p>	<p>Concentración</p>	<p><i>Concentración final de Zinc</i></p>	<p>mg/L</p>		<p>Observación experimental</p>
							<p><i>Concentración final de Hierro</i></p>	<p>mg/L</p>		
							<p><i>Eficiencia de reducción de Zinc</i></p>	<p>%</p>		
<p><i>Eficiencia de reducción de Hierro</i></p>	<p>%</p>									

Anexo 2 Metodología para desarrollo del hierro

Iron, Total

DOC316.53.01053

USEPA¹ FerroVer[®] Method²

Method 8008

0.02 to 3.00 mg/L Fe

Powder Pillows or AccuVac[®] Ampuls

Scope and application: For water, wastewater and seawater; digestion is required for determining total iron.

¹ USEPA approved for reporting wastewater analysis, Federal Register, June 27, 1980; 45 (126:43459).

² Adapted from Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.



Test preparation

Instrument-specific information

Table 1 shows sample cell and orientation requirements for reagent addition tests, such as powder pillow or bulk reagent tests. Table 2 shows sample cell and adapter requirements for AccuVac Ampul tests. The tables also show all of the instruments that have the program for this test.

To use the table, select an instrument, then read across to find the applicable information for this test.

Table 1 Instrument-specific information for reagent addition

Instrument	Sample cell orientation	Sample cell
DR 6000 DR 3800 DR 2800 DR 2700 DR 1900	The fill line is to the right.	2495402 
DR 5000 DR 3900	The fill line is toward the user.	2401906 
DR 900	The orientation mark is toward the user.	

Table 2 Instrument-specific information for AccuVac Ampuls

Instrument	Adapter	Sample cell
DR 6000 DR 5000 DR 900	—	2427606 
DR 3900	LZV846 (A)	2122800 
DR 1900	9609900 or 9609800 (C)	
DR 3800 DR 2800 DR 2700	LZV584 (C)	

Before starting

Install the instrument cap on the DR 900 cell holder before ZERO or READ is pushed.

The reagent in this test procedure converts all soluble iron and most insoluble forms of iron in the sample to soluble ferrous iron for measurement. For regulatory reporting, however, the sample must be digested with heat and acid to make sure that all forms of the metal are measured.

For the best results, measure the reagent blank value for each new lot of reagent. Replace the sample with deionized water in the test procedure to determine the reagent blank value. Subtract the reagent blank value from the sample results automatically with the reagent blank adjust option.

For turbid samples, treat the blank with one 0.1-g scoop of RoVer Rust Remover. Swirl to dissolve.

Review the Safety Data Sheets (MSDS/SDS) for the chemicals that are used. Use the recommended personal protective equipment.

Dispose of reacted solutions according to local, state and federal regulations. Refer to the Safety Data Sheets for disposal information for unused reagents. Refer to the environmental, health and safety staff for your facility and/or local regulatory agencies for further disposal information.

Items to collect

Powder pillows

Description	Quantity
FerroVer [®] Iron Reagent Powder Pillows, 10-mL ¹	1
Sample cells. (For information about sample cells, adapters or light shields, refer to Instrument-specific information on page 1.)	2

¹ FerroVer is a registered trademark of Hach Company.

Refer to [Consumables and replacement items](#) on page 7 for order information.

AccuVac Ampuls

Description	Quantity
FerroVer [®] Iron Reagent AccuVac [®] Ampul	1
Beaker, 50-mL	1
Sample cells (For information about sample cells, adapters or light shields, refer to Instrument-specific information on page 1.)	1
Stopper for 18-mm tubes and AccuVac Ampuls	1

Refer to [Consumables and replacement items](#) on page 7 for order information.

Sample collection and storage

- Collect samples in clean glass or plastic bottles that have been cleaned with 6 N (1:1) hydrochloric acid and rinsed with deionized water.
- To measure only dissolved iron, filter the sample immediately after collection and before acidification.
- To preserve samples for later analysis, adjust the sample pH to less than 2 with concentrated nitric acid (approximately 2 mL per liter). No acid addition is necessary if the sample is tested immediately.
- Keep the preserved samples at room temperature for a maximum of 6 months.
- Before analysis, adjust the pH to 3–5 with 5 N sodium hydroxide solution.
- Correct the test result for the dilution caused by the volume additions.

Powder pillow procedure



1. Start program **265 Iron, FerroVer**. For information about sample cells, adapters or light shields, refer to [Instrument-specific information](#) on page 1.

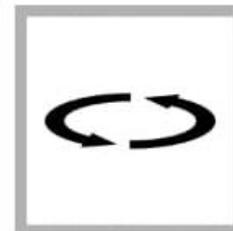
Note: Although the program name can be different between instruments, the program number does not change.



2. **Prepare the sample:** Fill a sample cell with 10 mL of sample.



3. Add the contents of one FerroVer Iron Reagent Powder Pillow to the sample cell.



4. Swirl the sample cell to mix. Undissolved powder will not affect accuracy.

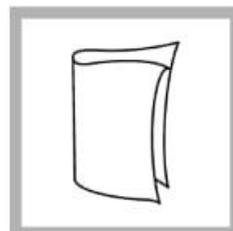


5. Start the instrument timer. A 3-minute reaction time starts.

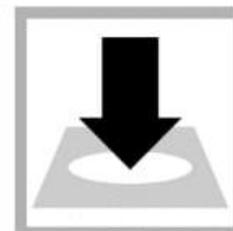
An orange color will show if iron is present. Let samples that contain rust react for 5 minutes or more.



6. **Prepare the blank:** Fill a second sample cell with 10 mL of sample.



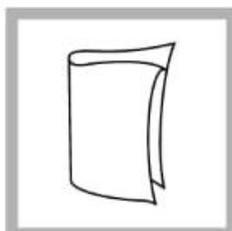
7. Clean the blank sample cell.



8. When the timer expires, insert the blank into the cell holder.



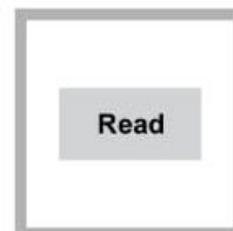
9. Push **ZERO**. The display shows 0.00 mg/L Fe.



10. Clean the prepared sample cell.



11. Insert the prepared sample into the cell holder.



12. Push **READ**. Results show in mg/L Fe.

AccuVac procedure



1. Start program **267 Iron, FerroVer AV**. For information about sample cells, adapters or light shields, refer to [Instrument-specific information](#) on page 1.

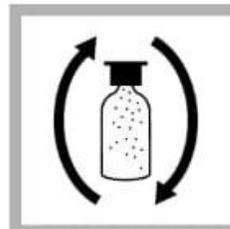
Note: Although the program name can be different between instruments, the program number does not change.



2. **Prepare the blank:** Fill the sample cell with 10 mL of sample.



3. **Prepare the sample:** Collect at least 40 mL of sample in a 50-mL beaker. Fill the AccuVac Ampul with sample. Keep the tip immersed while the AccuVac Ampul fills completely.



4. Quickly invert the AccuVac Ampul several times to mix. Undissolved powder will not affect accuracy.



5. Start the instrument timer. A 3-minute reaction time starts.

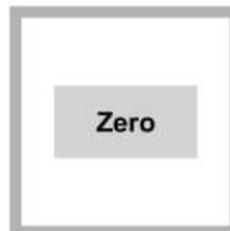
An orange color will show if iron is present. Let samples that contain rust react for 5 minutes or more.



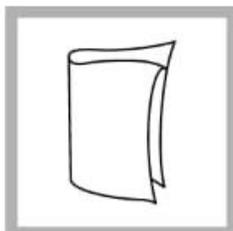
6. Clean the blank sample cell.



7. When the timer expires, insert the blank into the cell holder.



8. Push **ZERO**. The display shows 0.00 mg/L Fe.



9. Clean the AccuVac Ampul.



10. Insert the prepared sample AccuVac Ampul into the cell holder.



11. Push **READ**. Results show in mg/L Fe.

Consumables and replacement items

Required reagents

Description	Quantity/Test	Unit	Item no.
FerroVer [®] Iron Reagent Powder Pillow ¹ , 10-mL	1	100/pkg	2105769
OR			
FerroVer [®] Iron Reagent AccuVac [®] Ampul	1	25/pkg	2507025

¹ FerroVer is a registered trademark of Hach Company

Required apparatus

Description	Quantity/Test	Unit	Item no.
Beaker, 50-mL	1	each	50041H
Stoppers for 18-mm tubes and AccuVac Ampuls	2	6/pkg	173106

Recommended standards and apparatus

Description	Unit	Item no.
Flask, volumetric, Class A, 100-mL glass	each	1457442
Iron Standard Solution, 100-mg/L Fe	100 mL	1417542
Iron Standard Solution, 10-mL Voluette [®] Ampule, 25-mg/L Fe	16/pkg	1425310
Metals Drinking Water Standard, LR for Cu, Fe, Mn	500 mL	2833749
Metals Drinking Water Standard, HR for Cu, Fe, Mn	500 mL	2833649
Pipet filler, safety bulb	each	1465100
Pipet, TenSette [®] , 0.1–1.0 mL	each	1970001
Pipet tips for TenSette [®] Pipet, 0.1–1.0 mL	50/pkg	2185696
Pipet tips for TenSette [®] Pipet, 0.1–1.0 mL	1000/pkg	2185628
Pipet, volumetric, Class A, 2-mL	each	1451536
Water, deionized	4 L	27256

Optional reagents and apparatus

Description	Unit	Item no.
AccuVac [®] Ampul Snapper	each	2405200
Mixing cylinder, graduated, 50-mL	each	189641
Filter, glass fiber membrane, 1.5-micron, 47-mm	100/pkg	253000
Filter membrane filter holder, 47-mm	each	234000
Hydrochloric Acid, concentrated	500 mL	13449
Nitric Acid, concentrated	500 mL	15249
RoVer Rust Remover	454 g	30001
Sodium Hydroxide Standard Solution, 5.0 N	100 mL MDB	245032
Spoon, measuring, 0.1-g	each	51100

6. Use the test procedure to measure the concentration of each of the spiked samples. Start with the smallest sample spike. Measure each of the spiked samples in the instrument.
7. Select **Graph** to compare the expected results to the actual results.
Note: If the actual results are significantly different from the expected results, make sure that the sample volumes and sample spikes are measured accurately. The sample volumes and sample spikes that are used should agree with the selections in the standard additions menu. If the results are not within acceptable limits, the sample may contain an interference.

Standard solution method

Use the standard solution method to validate the test procedure, the reagents and the instrument.

Items to collect:

- Iron standard solution, 100 mg/L
- 100-mL volumetric flask, Class A
- 2-mL volumetric pipet, Class A and pipet filler
- Deionized water

1. Prepare a 2.00-mg/L iron standard solution as follows:
 - a. Use a pipet to add 2 mL of the 100-mg/L iron standard solution into the volumetric flask.
 - b. Dilute to the mark with deionized water. Mix well. Prepare this solution daily.
2. Use the test procedure to measure the concentration of the prepared standard solution.
3. Compare the expected result to the actual result.

Note: The factory calibration can be adjusted slightly with the standard adjust option so that the instrument shows the expected value of the standard solution. The adjusted calibration is then used for all test results. This adjustment can increase the test accuracy when there are slight variations in the reagents or instruments.

Method performance

The method performance data that follows was derived from laboratory tests that were measured on a spectrophotometer during ideal test conditions. Users can get different results under different test conditions.

Program	Standard	Precision (95% Confidence Interval)	Sensitivity Concentration change per 0.010 Abs change
265	2.00 mg/L Fe	1.99–2.01 mg/L Fe	0.021 mg/L Fe
267	2.00 mg/L Fe	1.98–2.02 mg/L Fe	0.023 mg/L Fe

Summary of method

FerroVer Iron Reagent converts all soluble iron and most insoluble forms of iron in the sample to soluble ferrous iron. The ferrous iron reacts with the 1-10 phenanthroline indicator in the reagent to form an orange color in proportion to the iron concentration. The measurement wavelength is 510 nm for spectrophotometers or 520 nm for colorimeters.

Interferences

Interfering substance	Interference level
Calcium, Ca ²⁺	No effect at less than 10,000 mg/L as CaCO ₃ .
Chloride, Cl ⁻	No effect at less than 185,000 mg/L.
Copper, Cu ²⁺	No effect. Masking agent is contained in FerroVer Reagent.
High iron levels	Inhibit color development. Dilute sample and re-test to verify results.
Iron oxide	A mild, vigorous or Digesdahl digestion is necessary. After digestion, adjust the sample pH to 3–5 with sodium hydroxide, then analyze.
Magnesium	No effect at 100,000 mg/L as CaCO ₃ .
Molybdate molybdenum	No effect at 50 mg/L as Mo.
High sulfide levels, S ²⁻	<p>Pretreat the sample in a fume hood or in an area with sufficient airflow before analysis:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Add 5 mL of 6.0 N (1:1) hydrochloric acid solution to 100 mL of sample in a 250-mL Erlenmeyer flask. 2. Boil for 20 minutes. 3. Let the solution cool to room temperature. 4. Adjust the pH to 3–5 with 5 N sodium hydroxide solution. 5. Add deionized water until the volume is 100 mL. 6. Use the treated sample in the test procedure.
Turbidity	<p>Pre-treat the sample before analysis:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Add one 0.1-g scoop of RoVer[®] Rust Remover to the blank. Swirl to mix. 2. If the sample remains turbid, add three 0.2-g scoops of RoVer Rust Remover to 75 mL of sample. Let stand 5 minutes. 3. Filter through a 0.45-micron membrane filter and filter holder. 4. Use the treated sample in the test procedure.
Highly buffered samples or extreme sample pH	Can prevent the correct pH adjustment of the sample by the reagents. Sample pre-treatment may be necessary. Adjust the pH to 3–5.

Accuracy check

Standard additions method (sample spike)

Use the standard additions method (for applicable instruments) to validate the test procedure, reagents and instrument and to find if there is an interference in the sample.

Items to collect:

- Iron Voluette[®] Ampule Standard, 25 mg/L
- Ampule Breaker
- Pipet, TenSette[®], 0.1–1.0 mL and tips

1. Use the test procedure to measure the concentration of the sample, then keep the (unspiked) sample in the instrument.
2. Go to the Standard Additions option in the instrument menu.
3. Select the values for standard concentration, sample volume and spike volumes.
4. Open the standard solution.
5. Prepare three spiked samples: use the TenSette pipet to add 0.1 mL, 0.2 mL and 0.3 mL of the standard solution, respectively, to three 10-mL portions of fresh sample. Mix well.

Note: For AccuVac[®] Ampuls, add 0.2 mL, 0.4 mL and 0.6 mL of the standard solution to three 50-mL portions of fresh sample.

Anexo 3 Metodología para desarrollo del zinc

Zinc

DOC316.53.01476

USEPA¹ Zincon Method²

Method 8009

0.02 to 3.00 mg/L Zn

Powder Pillows

Scope and application: For water and wastewater. Digestion is required for a total zinc analysis.

¹ USEPA approved for wastewater analyses 3500 Zn B: Federal Register, 45(105) 36166 (May 29, 1980).

² Adapted from Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.



Test preparation

Before starting

Clean all glassware with 6.0 N (1:1) hydrochloric acid, then fully rinse with deionized water to remove contaminants.
Use only glass-stoppered mixing cylinders in this procedure.
Make sure that the dropper that is used in this procedure is plastic. Droppers that have rubber bulbs can contaminate the reagent.
Do not use the Pour-Thru Cell or sipper module (for applicable instruments) with this test.
The reagents that are used in this test contain potassium cyanide. Keep cyanide solutions at pH > 11 to prevent exposure to hydrogen cyanide gas. Collect the reacted samples for safe disposal.
Always do tests in sample cells. Do not put the instrument in the sample or pour the sample into the cell holder.
Make sure that the sample cells are clean and there are no scratches where the light passes through them.
Rinse the sample cell and cap with the sample three times before the sample cell is filled.
Make sure that there are no fingerprints or liquid on the external surface of the sample cells. Wipe with a lint-free cloth before measurement.
Cold waters can cause condensation on the sample cell or bubbles in the sample cell during color development. Examine the sample cell for condensation or bubbles. Remove condensation with a lint-free cloth. Invert the sample cell to remove bubbles.
Install the instrument cap over the cell holder before ZERO or READ is pushed.
After the test, immediately empty and rinse the sample cell. Rinse the sample cell and cap three times with deionized water.
Review the Safety Data Sheets (MSDS/SDS) for the chemicals that are used. Use the recommended personal protective equipment.
Dispose of reacted solutions according to local, state and federal regulations. Refer to the Safety Data Sheets for disposal information for unused reagents. Refer to the environmental, health and safety staff for your facility and/or local regulatory agencies for further disposal information.

Items to collect

Description	Quantity
Cyclohexanone	0.5 mL
ZincoVer [®] 5 Reagent Powder Pillow, 20-mL	1
Cylinder, graduated, 25-mL	1
Sample cells, 25-mm (10 mL)	2

Refer to [Consumables and replacement items](#) on page 5 for order information.

Sample collection and storage

- Collect samples in clean glass or plastic bottles that have been cleaned with 6 N (1:1) hydrochloric acid and rinsed with deionized water.

1

- To preserve samples for later analysis, adjust the sample pH to less than 2 with concentrated nitric acid (about 2 mL per liter). No acid addition is necessary if the sample is tested immediately.
- Keep the preserved samples at room temperature for a maximum of 6 months.
- Before analysis, adjust the pH to 4–5 with 5 N sodium hydroxide solution. Do not exceed pH 5 as zinc can precipitate. Do not add the reagent to samples with a pH less than 4 because there is cyanide in the reagent.
- Correct the test result for the dilution caused by the volume additions.

Powder pillow procedure



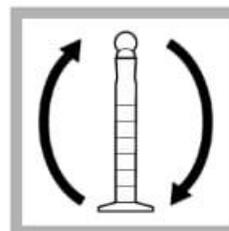
1. Set the instrument to zinc (Zn).
For DR300, push the up arrow button. For PCII, push the menu button, checkmark button, then the menu button again.



2. Fill a 25-mL graduated mixing cylinder with 20 mL of sample.



3. Add the contents of one ZincoVer 5 Reagent Powder Pillow to the mixing cylinder.



4. Close the cylinder. Invert the cylinder several times to dissolve the powder completely. Inconsistent readings may result if all the particles are not dissolved. The sample should be orange. If the sample is brown or blue, the zinc concentration is too high or an interfering metal is present. Dilute the sample and do the test again.



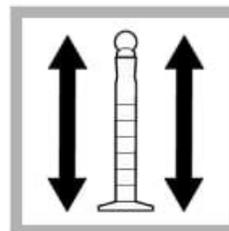
5. **Prepare the blank:** Fill a sample cell to the 10-mL mark with the solution.



6. **Prepared the sample:** Use a plastic dropper to add 0.5 mL of cyclohexanone to the solution in the mixing cylinder.



7. Set and start a timer for 30 seconds. A 30-second reaction time starts.



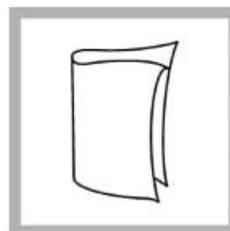
8. During the reaction period, close the mixing cylinder and vigorously shake the prepared sample. The sample becomes reddish-orange, brown or blue. The color is dependent on the zinc concentration.



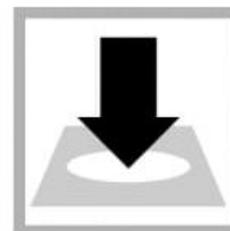
9. Set and start a timer for 3 minutes. A 3-minute reaction time starts. During the reaction period, complete the next step.



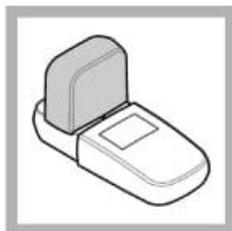
10. Fill a sample cell to the 10-mL mark with the prepared sample solution.



11. When the timer expires, clean the blank sample cell.



12. Insert the blank into the cell holder. Point the diamond mark on the sample cell toward the keypad.



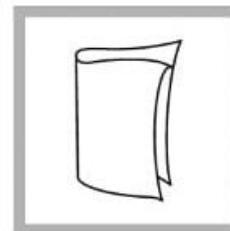
13. Install the instrument cap over the cell holder.



14. Push **ZERO**. The display shows "0.00".



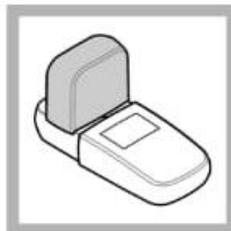
15. Remove the sample cell from the cell holder.



16. Clean the prepared sample cell.



17. Insert the prepared sample into the cell holder. Point the diamond mark on the sample cell toward the keypad.



18. Install the instrument cap over the cell holder.



19. Push **READ**. Results show in mg/L Zn.

Interferences

Interfering substance	Interference level
Aluminum	More than 6 mg/L
Cadmium	More than 0.5 mg/L
Copper	More than 5 mg/L
Iron (ferric)	More than 7 mg/L
Manganese	More than 5 mg/L
Nickel	More than 5 mg/L
Organic Material	Large amounts may interfere. Pretreat the sample with a digestion.

Interfering substance	Interference level
Highly buffered samples or extreme sample pH	Can prevent the correct pH adjustment (of the sample) by the reagents. Sample pretreatment may be necessary. Adjust the pH to 4–5.
Amino-tri(methylene phosphonic acid) (AMP)	Samples that contain AMP cause a negative interference. Digest the sample to remove this interference (use the total phosphorus hot plate digestion, Method 8190). Note: Be sure to adjust the pH of the sample after the digestion to pH 4–5 with sodium hydroxide before the zinc analysis.

Pollution prevention and waste management

Reacted samples contain potassium cyanide and must be disposed of as a hazardous waste. Dispose of reacted solutions according to local, state and federal regulations.

Digestion

For total zinc determinations, the sample must be digested with heat and acid to make sure that all forms of the metal are measured. The steps that follow can be used for a mild digestion.

Note: The following procedure is the USEPA mild digestion procedure. Refer to the *Water Analysis Guide* for more digestion procedures.

- Add concentrated nitric acid to the sample with a glass serological pipet and pipet filler:
 - If the sample was acidified for preservation, add 3 mL of nitric acid to 1 liter of the preserved sample.
 - If the sample was not acidified for preservation, add 5 mL of nitric acid to 1 liter of sample.
- Transfer 100 mL of acidified sample to a 250-mL Erlenmeyer flask.
- Add 5 mL of 1:1 hydrochloric acid.
- Put the sample on a hot plate at 95 °C (203 °F) until 15–20 mL of the sample remains. Make sure that the sample does not boil.
- Put the cooled sample through a 0.45- μ m filter to remove any insoluble material.
- Adjust the pH of the digested sample to pH 4–5 with 5.0 N sodium hydroxide. Do not exceed pH 5 as zinc may precipitate.
- Quantitatively transfer the sample to a 100-mL volumetric flask and dilute to the mark with deionized water.

Accuracy check

Standard additions method

Use the standard additions method to validate the test procedure, reagents and instrument and to find if there is an interference in the sample.

Items to collect:

- Zinc Standard Solution, 10-mg/L Voluette[®] Ampule, 25-mL as Zn
 - Ampule breaker
 - Pipet, TenSette[®], 0.1–1.0 mL and tips
 - Mixing cylinders, 25-mL (3)
- Prepare three spiked samples: use the TenSette pipet to add 0.1 mL, 0.2 mL and 0.3 mL of the standard solution, respectively, to three 25-mL portions of fresh sample. Mix well.
 - Use the test procedure to measure the concentration of each of the spiked samples. Start with the smallest sample spike. Measure each of the spiked samples in the instrument.
 - Compare the expected result to the actual result. The expected zinc concentration increase is 0.1 mg/L for each 0.1 mL of standard that is added.

Standard solution method

Use the standard solution method to validate the test procedure, the reagents and the instrument.

Items to collect:

- Zinc Standard Solution, 100-mg/L
- 100-mL volumetric flask, Class A
- 2-mL volumetric pipet, Class A and pipet filler
- Deionized water

1. Prepare a 2.00-mg/L zinc standard solution as follows:
 - a. Use a pipet to add 2.0 mL of 100-mg/L zinc standard solution into the volumetric flask.
 - b. Dilute to the mark with deionized water. Mix well. Prepare this solution daily.
2. Use the test procedure to measure the concentration of the prepared standard solution.
3. Compare the expected result to the actual result.

Note: The factory calibration can be adjusted slightly with the standard calibration adjust option so that the instrument shows the expected value of the standard solution. The adjusted calibration is then used for all test results. This adjustment can increase the test accuracy when there are small variations in the reagents or instruments.

Method performance

The method performance data that follows was derived from laboratory tests that were measured on a DR300 and a Pocket Colorimeter II during ideal test conditions. Users can get different results under different test conditions.

Precision (95% confidence interval)
2.00 ± 0.08 mg/L Zn

Summary of method

Zinc and other metals in the sample are complexed with cyanide. The addition of cyclohexanone causes a selective release of zinc. The zinc reacts with 2-carboxy-2'-hydroxy-5'-sulfoformazy benzene (zincon) indicator to form a blue-colored species. The blue color is masked by the brown color from the excess indicator. The intensity of the blue color is proportional to the amount of zinc present.

Consumables and replacement items

Required reagents

Description	Quantity/test	Unit	Item no.
Zinc Reagent Set, 20-mL sample size, includes:	—	100 tests	2429300
Cyclohexanone	0.5 mL	100 mL MDB	1403332
ZincoVer [®] 5 Reagent Powder Pillow, 20-mL	1	100/pkg	2106669

Required apparatus

Description	Quantity/Test	Unit	Item no.
Mixing cylinder, graduated, 25 mL with stopper	1	each	2088640
Sample cells, 10-mL round, 25 mm x 60 mm	2	6/pkg	2427606

Recommended standards

Description	Unit	Item no.
Water, deionized	4 L	27256
Zinc Standard Solution, 100 mg/L	100 mL	237842
Zinc Standard Solution, 10-mg/L Voluette® Ampule, 25-mL as Zn	16/pkg	1424610
Zinc Standard Solution, 1000 mg/L	100 mL	1417742

Optional reagents and apparatus

Description	Unit	Item no.
Flask, Erlenmeyer, 250 mL	each	50546
Hot plate, 4-inch round, 120 V	each	1206701
Hydrochloric Acid Solution, 6.0 N (1:1)	500 mL	88449
Nitric Acid, concentrated	500 mL	15249
Pipet, TenSette®, 0.1–1.0 mL	each	1970001
Pipet tips for TenSette® Pipet, 0.1–1.0 mL	50/pkg	2185696
Ampule Breaker, 10-mL Voluette® Ampules	each	2196800
Pipet, volumetric, Class A, 2 mL	each	1451536
Pipet filler, safety bulb	each	1465100
Flask, volumetric, Class A, 100 mL, glass	each	1457442



FOR TECHNICAL ASSISTANCE, PRICE INFORMATION AND ORDERING:
In the U.S.A. – Call toll-free 800-227-4224
Outside the U.S.A. – Contact the HACH office or distributor serving you.
On the Worldwide Web – www.hach.com E-mail – techhelp@hach.com

HACH COMPANY
WORLD HEADQUARTERS
Telephone: (970) 669-3050
FAX: (970) 669-2932

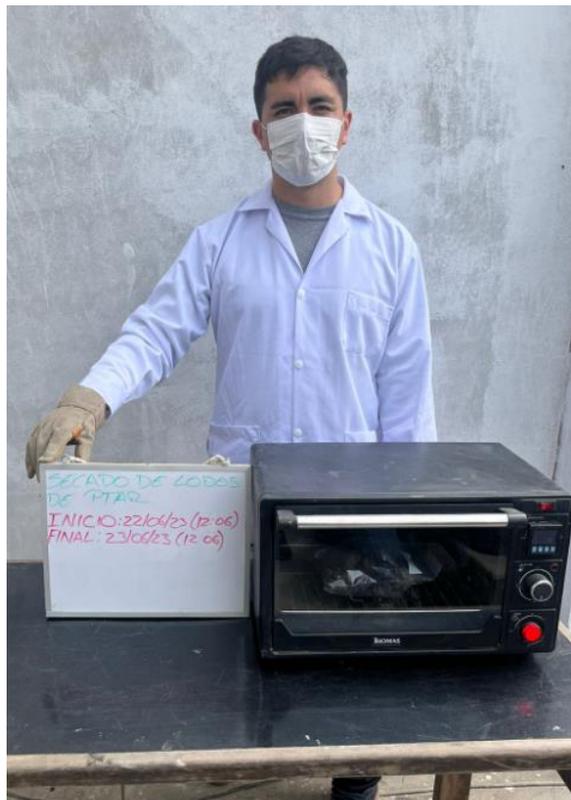
Anexo 4 Registro fotográfico de la toma de muestra de las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha en Pasco



Anexo 5 Registro fotográfico de la toma de muestra de lodos de la PTAR San Antonio de Carapongo



Anexo 6 Registro fotográfico del proceso de secado del lodo de PTAR



Anexo 7 Registro fotográfico del proceso de generación de Biocarbón de PTAR mediante proceso de pirólisis a temperaturas de 350°C y 650 °C en el horno Piroclítico.



Anexo 8 Registro fotográfico del proceso de molienda y tamizado del biocarbón



Anexo 9 Registro fotográfico del proceso de pesado de la dosis de biocarbón y su aplicación sobre la muestra de agua ácida



Anexo 10 Registro fotográfico de las muestras en el agitador



Anexo 11 Registro fotográfico de las muestras tratadas



Anexo 12 Registro fotográfico de algunas mediciones del equipo espectrofotómetro DR1900 sobre las muestras tratadas



Anexo 13 Resultados de análisis de laboratorio del biocarbón de lodo de PTAR



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS
S.A.C.

INFORME DE ENSAYO IE-2023-1005

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : LUIGI BRAVO TOLEDO
1.2 RUC o DNI : 70440773
1.3 Dirección : No Precisa

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : BIOCARBÓN
2.2 Muestreado por : CLIENTE (C)
2.3 Número de Muestras : 02
2.4 Fecha de Recepción : 2023-07-27
2.5 Periodo de Ensayo : 2023-07-27 al 2023-08-08
2.6 Fecha de Emisión : 2023-08-08
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-119260-SL23

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Caracterización de materiales por Análisis de Espectroscopía Infrarroja FTIR-ATR	ASTM E1252 Práctica estándar para técnicas generales de obtención de espectros infrarrojos para análisis cualitativo

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Descripción de muestras
S-1707	BIOCARBÓN - 350°C (C)
S-1708	BIOCARBÓN - 650°C (C)


DIEGO ROMANO VERGARA (P)
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA FTIR-ATR (S-1707)

- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo -Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 380 cm-1a 4000 cm-1

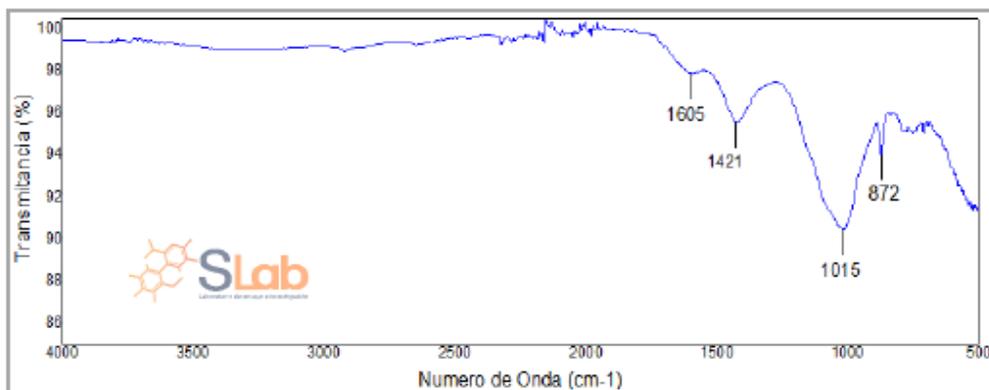


Figura N°1: BARRIDO ESPECTRAL FTIR DE LA MUESTRA S-0982

Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE LOS GRUPOS FUNCIONALES DEL FTIR DE LA MUESTRA S-1707

Tipo de Vibración	Grupo funcional	Rango Teórico (cm ⁻¹)	Resultado experimental (cm ⁻¹)
Banda de vibración de deformación	"C=C"	1655 al 1530	1605
Banda de vibración de deformación	"O-H"	1470 al 1390	1421
Banda de vibración de deformación	"C-O"	1100 al 1000	1015
Banda de vibración de deformación	"C-H"	890 al 850	872

INFORME DE ENSAYO IE-2023-1005

4.3. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA FTIR-ATR (S-1708)

- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo -Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 380 cm-1a 4000 cm-1

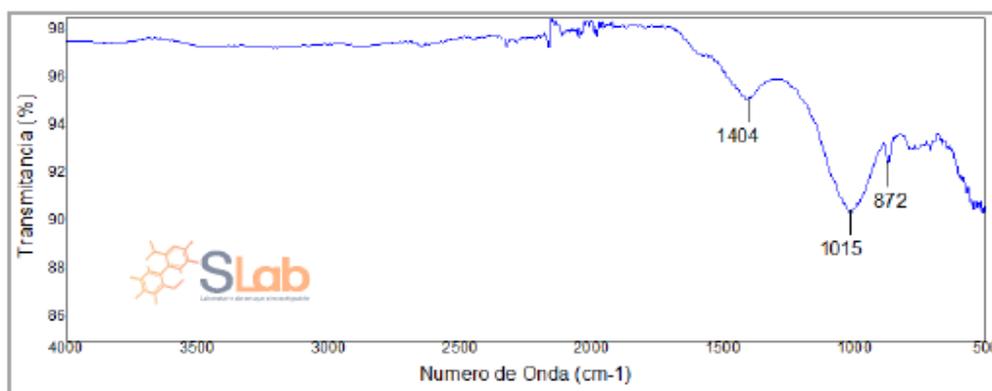


Figura N°1: BARRIDO ESPECTRAL FTIR DE LA MUESTRA S-1708

Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE LOS GRUPOS FUNCIONALES DEL FTIR DE LA MUESTRA S-1708

Tipo de Vibración	Grupo funcional	Rango Teórico (cm ⁻¹)	Resultado experimental (cm ⁻¹)
Banda de vibración de deformación	"-O-H"	1470 al 1390	1404
Banda de vibración de deformación	"-C-O-"	1100 al 1000	1015
Banda de vibración de deformación	"-C-H"	890 al 850	872

Leyenda

(^Q) Información suministrada por el cliente.

FIN DE DOCUMENTO

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.