

# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS  
NATURALES



## “PIRÓLISIS DE LODOS RESIDUALES DE ACUICULTURA Y CALIDAD DEL BIOCARBÓN COMO ENMIENDA DE SUELO, PARIAMARCA, CANTA-LIMA”

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

AUTORES:

GARY KEN DARIO CORO VALIENTE

DAVID ELÍAS SALAZAR BUSTAMANTE

ASESOR: ALEX WILLY PILCO NUÑEZ

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° 012-2023 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. 116 ACTA N°012-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.**

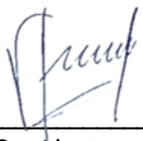
A los 1 días del mes de octubre del año 2023, siendo las 11:02 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/fyg-foyt-xpc>, el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

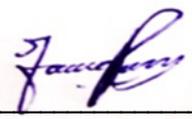
<b>Dr.</b>	<b>Eduardo Valdemar Trujillo Flores</b>	<b>: Presidente</b>
<b>Mtro.</b>	<b>Carlos Odorico Tome Ramos</b>	<b>: Secretario</b>
<b>MsC.</b>	<b>María Antonieta Gutiérrez Díaz</b>	<b>: Vocal</b>
<b>Mg.</b>	<b>Luís Enrique Lozano Vieytes</b>	<b>: Suplente</b>
<b>Mg.</b>	<b>Alex Willy Pilco Niñez</b>	<b>: Asesor</b>

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los Bachilleres David Elías Salazar Bustamante y Gary Ken Dario Coro Valiente, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: **“PIRÓLISIS DE LODOS RESIDUALES DE ACUICULTURA Y CALIDAD DEL BIOCARBÓN COMO ENMIENDA DE SUELO, PARIAMARCA, CANTALIMA”**, 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 Excelente y calificación cuantitativa Dieciocho (18) 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 11:46 horas del día domingo 1 de octubre del año en curso.

  
\_\_\_\_\_  
**Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
**Secretario**

  
\_\_\_\_\_  
**Vocal**

  
\_\_\_\_\_  
**Asesor**

## Document Information

Analyzed document	1A; SALAZAR BUSTAMANTE; David Elías_CORO VALIENTE; Gary Ken Dario_IF TESIS.pdf (D173991487)
Submitted	9/16/2023 12:21:00 AM
Submitted by	
Submitter email	fiarn.investigacion@unac.edu.pe
Similarity	1%
Analysis address	unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>1566324104_Proyecto de materia integradora_Barzola_Reyes.docx</b> Document 1566324104_Proyecto de materia integradora_Barzola_Reyes.docx (D54920474)		<b>1</b>
<b>SA</b>	<b>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</b> 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		<b>3</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS_CHAVEZ CAVAGLIA-MUCHA BERAUN-OLIVERA LOAYZA.pdf</b> Document TESIS_CHAVEZ CAVAGLIA-MUCHA BERAUN-OLIVERA LOAYZA.pdf (D172859529) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		<b>1</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS_CARMONA MENDEZ-BRUNO GREY_BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFE, MEDIANTE PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023..pdf</b> Document TESIS_CARMONA MENDEZ-BRUNO GREY_BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFE, MEDIANTE PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023..pdf (D172859416) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		<b>5</b>

## Entire Document

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:**

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:**

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

**TÍTULO:**

PIRÓLISIS DE LODOS RESIDUALES DE ACUICULTURA Y CALIDAD DEL BIOCARBÓN COMO ENMIENDA DE SUELO, PARIAMARCA, CANTA-LIMA.

**AUTORES:**

GARY KEN DARIO CORO VALIENTE. CÓDIGO ORCID: 0009-0007-0467-1302. DNI: 73745773.

DAVID ELÍAS SALAZAR BUSTAMANTE. CÓDIGO ORCID: 0009-0009-0560-0041. DNI: 48437186.

**ASESOR:**

ALEX WILLY PILCO NÚÑEZ. CÓDIGO ORCID: 0000-0002-3911-6428. DNI: 10291118.

**LUGAR DE EJECUCIÓN:**

LABORATORIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

**UNIDAD DE ANÁLISIS:**

BIOCARBÓN.

**TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:**

BÁSICA / CUANTITATIVO / EXPERIMENTAL.

**TEMA OCDE:** 1.05.08 -- CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE

## **DEDICATORIA**

A Dios, por su bendición y amor incondicional. A mi madre, que con su inquebrantable dedicación y apoyo han sido fundamentales en cada paso que he dado en mi vida y me inspiran a ser una persona resiliente. A mi mamita Emilia Leyva F., por su amor incondicional y presencia en mi vida, siendo un gran ejemplo a seguir.

**David Salazar Bustamante**

Para el recuerdo de mi abuela, a la que agradezco todo el amor y apoyo que me brindó. A mis padres, que siempre están a mi lado y me brindan su apoyo incondicional en cada reto que se me presenta. A mi hermana, que con su ejemplo me motiva e impulsa a ser cada vez mejor.

**Gary Coro Valiente**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional del Callao, en especial a nuestra casa de estudios, la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, así como a los docentes que desempeñaron un papel fundamental en nuestro desarrollo académico, profesional y personal.

A nuestros familiares, que nos brindaron su apoyo y creyeron en nosotros, animándonos a seguir adelante sin importar las dificultades.

A nuestro asesor, M. Sc. Alex Willy Pilco Núñez, por habernos orientado y apoyado en el desarrollo de la presente investigación.

A Camilo Cuba, por confiar en nosotros y facilitarnos el acceso a su piscigranja, que hizo posible el desarrollo experimental de la investigación.

Por último, a todas las personas que, de alguna forma, contribuyeron a nuestro crecimiento profesional a través de sus valiosos consejos y experiencias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 Descripción de la realidad problemática	17
1.2 Formulación del problema	18
1.3 Objetivos	19
1.4 Justificación	19
1.5 Delimitantes de la investigación	20
II. MARCO TEÓRICO	21
2.1 Antecedentes	21
2.2 Bases teóricas	30
2.3 Marco conceptual	51
2.4 Definición de términos básicos	52
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	54

3.1	Hipótesis	54
3.2	Operacionalización de variable	55
IV.	METODOLOGÍA	57
4.1	Diseño metodológico	57
4.2	Método de investigación	64
4.3	Población y muestra	65
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado	66
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	66
4.6	Análisis y procesamiento de datos	69
4.7	Aspectos éticos en investigación	70
V.	RESULTADOS	71
5.1	Resultados descriptivos	71
5.2	Resultados inferenciales	76
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	81
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	82
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	92
VII.	CONCLUSIONES	93
VIII.	RECOMENDACIONES	94
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	ANEXOS	105

Anexo 1: Matriz de consistencia	105
Anexo 2: Base de datos	106
Anexo 3: Informe de ensayo	109
Anexo 4: Certificado de calibración de equipos	113
Anexo 5: Registro fotográfico	152

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Parámetros básicos para determinar la utilidad de un biocarbón .....</i>	37
<b>Tabla 2</b> <i>Criterio de evaluación de la fitotoxicidad.....</i>	42
<b>Tabla 3</b> <i>Criterios para la evaluación del biocarbón asociada al uso como enmienda de suelo.....</i>	43
<b>Tabla 4</b> <i>Características de diferentes lodos residuales provenientes de la acuicultura.....</i>	48
<b>Tabla 5</b> <i>Operacionalización de variable.....</i>	55
<b>Tabla 6</b> <i>Distribución de las unidades experimentales para la producción de biocarbón .....</i>	60
<b>Tabla 7</b> <i>Distribución de las unidades experimentales para la determinación de la fitotoxicidad.....</i>	63
<b>Tabla 8</b> <i>Coordenadas de ubicación de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima .....</i>	65
<b>Tabla 9</b> <i>Equipos e instrumentos de laboratorio .....</i>	68
<b>Tabla 10</b> <i>Técnicas analíticas de laboratorio .....</i>	69
<b>Tabla 11</b> <i>Rendimiento de producción del biocarbón.....</i>	71
<b>Tabla 12</b> <i>Medidas descriptivas del rendimiento de producción del biocarbón .</i>	71
<b>Tabla 13</b> <i>Caracterización del biocarbón de lodos residuales de acuicultura ...</i>	72
<b>Tabla 14</b> <i>Propiedades fisicoquímicas del biocarbón calculadas a partir del análisis elemental.....</i>	73
<b>Tabla 15</b> <i>Medidas descriptivas de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón .....</i>	74
<b>Tabla 16</b> <i>Índices de germinación de Zucconi del ensayo de fitotoxicidad .....</i>	75

<b>Tabla 17</b> <i>Medidas descriptivas de la prueba de fitotoxicidad.....</i>	75
<b>Tabla 18</b> <i>Prueba de normalidad de Shapiro Wilk de las propiedades fisicoquímicas.....</i>	76
<b>Tabla 19</b> <i>Prueba de Levene de igualdad de varianzas de los parámetros fisicoquímicos.....</i>	77
<b>Tabla 20</b> <i>Resultados de la prueba T de Student.....</i>	78
<b>Tabla 21</b> <i>Resultado de la prueba U de Mann-Whitney .....</i>	78
<b>Tabla 22</b> <i>Prueba de normalidad de Shapiro Wilk de la fitotoxicidad .....</i>	79
<b>Tabla 23</b> <i>Prueba de Levene de igualdad de varianzas de la fitotoxicidad .....</i>	79
<b>Tabla 24</b> <i>Prueba de ANOVA de un factor de la fitotoxicidad .....</i>	80
<b>Tabla 25</b> <i>Prueba post hoc HSD Tukey de la fitotoxicidad.....</i>	80
<b>Tabla 26</b> <i>Base de datos de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.....</i>	106
<b>Tabla 27</b> <i>Base de datos de la prueba de fitotoxicidad .....</i>	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Variación de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón con el aumento de la temperatura de pirólisis</i> .....	36
<b>Figura 2</b> <i>Propiedades físicas del suelo que son impactadas por el biocarbón</i>	44
<b>Figura 3</b> <i>Propiedades químicas del suelo que son impactadas por el biocarbón</i> .....	45
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama de los procedimientos experimentales</i> .....	57
<b>Figura 5</b> <i>Muestreo de lodos residuales de acuicultura</i> .....	58
<b>Figura 6</b> <i>Secado de lodos residuales de acuicultura</i> .....	59
<b>Figura 7</b> <i>Partes del reactor pirolítico empleado para la elaboración de biocarbón</i> .....	60
<b>Figura 8</b> <i>Biochar elaborado a partir de lodos residuales de acuicultura</i> .....	61
<b>Figura 9</b> <i>Análisis de pH y conductividad eléctrica</i> .....	62
<b>Figura 10</b> <i>Ensayo de fitotoxicidad del biocarbón</i> .....	63
<b>Figura 11</b> <i>Ubicación en mapa de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima</i> .....	65
<b>Figura 12</b> <i>Vista frontal de los estanques de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima</i> .....	66
<b>Figura 13</b> <i>Procesamiento estadístico de resultados obtenidos</i> .....	70
<b>Figura 14</b> <i>Toma de muestras de lodos residuales de acuicultura</i> .....	152
<b>Figura 15</b> <i>Proceso de secado de lodos residuales de acuicultura</i> .....	152
<b>Figura 16</b> <i>Pirólisis de lodos residuales de acuicultura</i> .....	153
<b>Figura 17</b> <i>Cálculo del rendimiento de producción de biocarbón</i> .....	153
<b>Figura 18</b> <i>Molienda y tamizado del biocarbón</i> .....	154
<b>Figura 19</b> <i>Procedimiento del ensayo de fitotoxicidad</i> .....	154

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASTM. *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*

BML. *Biomasa lignocelulósica*

BMNL. *Biomasa no lignocelulósica*

CE. *Conductividad eléctrica*

CF. *Carbón fijado*

C<sub>org</sub>. *Carbono orgánico*

DBO. *Demanda bioquímica de oxígeno*

DCA. *Diseño completamente al azar*

DQO. *Demanda Química de Oxígeno*

EEA. *Agencia Europea de Medio Ambiente*

FIARN. *Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales*

FT. *Fósforo total*

GEI. *Gases de efecto invernadero*

IBI. *Iniciativa internacional de biocarbón*

IG. *Índice de germinación*

MV. *Materia volátil*

NT. *Nitrógeno total*

NTK. *Nitrógeno de Kjeldhal*

PTAR. *Planta de tratamiento de aguas residuales*

ST. *Sólidos totales*

SV. *Sólidos volátiles*

TMECC. *Método de prueba para el análisis de compostaje y compost*

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo determinar la influencia de la pirólisis de lodos residuales de acuicultura en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo. La metodología de la investigación es de enfoque cuantitativo, tipo básico y nivel explicativo. Se obtuvieron muestras de lodos residuales de acuicultura de una piscigranja de truchas (*Salmo trutta*) ubicada en la Comunidad Pariamarca, Canta - Lima; éstas fueron previamente secadas y tamizadas, para posteriormente llevar a cabo el proceso de pirólisis en un reactor pirolítico de 5 litros de capacidad a temperaturas de 500 y 700 °C con un tiempo de retención de 1 hora. La calidad del biocarbón como enmienda de suelo se determinó a través de sus propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico, relación H:C<sub>org</sub>, nitrógeno total, potasio total, fósforo total, humedad, ceniza y materia volátil) y su fitotoxicidad (índice de germinación). De los resultados de la estadística descriptiva se evidencian variaciones en los parámetros fisicoquímicos y la fitotoxicidad a diferentes temperaturas de pirólisis, donde el H:C<sub>org</sub>, N total, P total, materia volátil y fitotoxicidad disminuyen; mientras que, el pH, C.E., C<sub>org</sub>, K total, humedad y cenizas aumentan con la temperatura de pirólisis. Para la estadística inferencial se aplicó la prueba T de Student y la prueba de U de Mann-Whitney, cuyos valores de p-valor fueron menores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), demostrando diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas a excepción del C<sub>org</sub> y P total; por otro lado, se aplicó la prueba de ANOVA, demostrando que existe diferencias significativas en los índices de germinación entre los grupos de tratamiento, debido a que el p-valor fue menor al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

Concluimos que la temperatura es un factor que dentro del proceso de pirólisis influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo, causando efectos sobre las propiedades fisicoquímicas y fitotoxicidad del biocarbón.

**Palabras clave:** biocarbón, enmienda de suelo, lodo residual de acuicultura, pirólisis, fitotoxicidad

## ABSTRACT

The aim of this research was to determine the influence of pyrolysis of aquaculture sewage sludge on the quality of the biochar as a soil improver. The methodology of the research is quantitative approach, basic type and explanatory level. Samples of residual aquaculture sludge were obtained from a trout fish farm (*Salmo trutta*) located in the Paríamarca Community, Canta - Lima; these were previously dried and sifted, to then carry out the pyrolysis process in a pyrolytic reactor of 5 liters of capacity at temperatures of 500 and 700 °C with a retention time of 1 hour. The quality of the biochar as a soil improver was determined through its physico-chemical properties (pH, electrical conductivity, organic carbon, H:C<sub>org</sub> ratio, total nitrogen, total potassium, total phosphorus, moisture, ash and volatile matter) and its phytotoxicity (germination rate). The results of the descriptive statistics show variations in the physicochemical parameters and phytotoxicity at different pyrolysis temperatures, where the H:C<sub>org</sub>, total N, total P, volatile matter and phytotoxicity decrease; whereas, the pH, C.E., C<sub>org</sub>, total K, moisture and ash increase with pyrolysis temperature. For inferential statistics, the Student T test and the U Mann-Whitney test were applied, whose p-value were less than the level of significance ( $\alpha = 0.05$ ), demonstrating significant differences in physico-chemical properties except for C<sub>org</sub> and total P; on the other hand, the ANOVA test was applied, showing that there are significant differences in germination rates between the treatment groups, because the p-value was lower than the level of significance ( $\alpha = 0.05$ ).

We conclude that temperature is a factor that within the pyrolysis process influences the quality of the biochar as a soil improver, causing effects mainly on the physico-chemical properties and phytotoxicity of the biochar.

**Keywords:** biochar, soil amendment, aquaculture sludge, pyrolysis, phytotoxicity

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación surgió como resultado de las visitas realizadas a las piscigranjas ubicadas en la provincia de Canta, departamento de Lima. En estas piscigranjas se desarrolla la acuicultura a través de la crianza de truchas; producto del desarrollo de esta actividad se generan lodos residuales, los cuales se descargan en el río Chillón. Estas descargas de lodos residuales sobre cuerpos de agua pueden causar eutrofización, agotamiento de oxígeno, mayor turbidez y aumento de la carga de sólidos totales en suspensión (Chen, Coffin, Malone 1997; del Campo et al. 2010). Así mismo, estos pueden contener patógenos que podrían infectar a poblaciones de peces silvestres (del Campo et al. 2010).

Se tomó como soporte para este trabajo de investigación, el estudio de Zhang, Qin, Yi (2020), quienes utilizaron como materia prima lodo de agua dulce proveniente de una planta de potabilización de agua, para la elaboración de biocarbón mediante el proceso de pirólisis.

El biocarbón es un material sólido, poroso y con un alto contenido de carbono que se obtiene a partir de la conversión termoquímica de la biomasa en un ambiente limitado de oxígeno (Chen et al. 2020); y sus propiedades únicas le permiten mejorar la capacidad de intercambio catiónico del suelo, ajustar el pH, retener agua y nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), aumentar la estabilidad del carbono en el suelo, entre otros (Xiao, Chen, Zhu 2014).

La presente investigación tiene como objetivo central determinar la influencia de la pirólisis de lodos residuales de acuicultura en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo, mediante el análisis de sus propiedades fisicoquímicas y fitotoxicidad.

# I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Descripción de la realidad problemática

La acuicultura es una actividad antropogénica que ha venido creciendo de manera progresiva en los últimos 50 años a nivel mundial, siendo el agua dulce (ríos, lagos y arroyos) fuente de cerca del 60 % de la producción acuícola mundial durante el 2008 (Bostock et al. 2010). En el Perú la acuicultura presenta un crecimiento anual del 20 % (Álvarez Verde 2012) y se espera un mayor crecimiento en los próximos años.

La intensificación de la actividad acuícola trae consigo mayores cantidades de desechos y lodos de pescado provenientes de los sistemas de producción (Bonnie Waycott 2021). Los lodos de la acuicultura corresponden a la descarga de menor volumen pero que concentra la mayor cantidad de nutrientes (N y P) y sólidos orgánicos (Summerfelt, Adler, Glenn 1998). Así mismo, se ha informado que el vertimiento de este tipo de descargas sin ningún tipo de tratamiento sobre cuerpos de agua puede causar eutrofización, agotamiento de oxígeno, mayor turbidez y aumento de la carga de sólidos totales en suspensión (Chen, Coffin, Malone 1997). Además, estos pueden contener patógenos que al llegar a los ríos podrían infectar a poblaciones de peces silvestres (del Campo et al. 2010).

En algunos países en desarrollo, enfoques universales de tratamiento de lodos residuales como el vertido y la incineración han causado una contaminación secundaria indeseable (Chen et al. 2020). La pirólisis es una alternativa de tratamiento más compleja a diferencia de la incineración; sin embargo, brinda beneficios potenciales que incluyen la generación de cero residuos, costos más bajos, menores impactos ambientales y una dependencia mucho menor de las reservas de combustibles fósiles que cada día son más escasos (Raheem et al. 2018).

El biocarbón es un material sólido producido a partir de la pirólisis de biomasa, que en años recientes ha despertado la curiosidad de los investigadores ante sus propiedades únicas que le permiten mejorar la

capacidad de intercambio catiónico del suelo, ajustar el pH, retener agua y nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), aumentar la estabilidad del carbono en el suelo y la adsorción de contaminantes orgánicos y metales pesados (Xiao, Chen, Zhu 2014). Es por ello, que se cree que el biocarbón es un agente de remediación de contaminantes, enmienda y secuestro de carbono en el suelo (Xiao, Chen, Zhu 2014). Los lodos residuales pueden servir de materia prima para la producción de biocarbón mediante pirólisis. Existe un número de estudios de laboratorio que se han realizado utilizando lodos residuales de PTAR y en algunos casos lodos de plantas de potabilización de agua (Agrafioti et al. 2013). Estos estudios buscan comprender la relación que existe entre las condiciones del proceso de pirólisis y las propiedades del biocarbón; siendo estas últimas las que determinarán sus potenciales aplicaciones.

La piscigranja “Pariamarca” ubicada en la provincia de Canta - Lima, se dedica a la crianza y venta de truchas, como parte de la actividad se generan lodos residuales conformados principalmente por alimento no consumido, excretas de los peces, y materia orgánica en descomposición (detritos). Los lodos residuales son removidos en una frecuencia quincenal durante el mantenimiento de los estanques y son dispuestos directamente sobre las aguas del río Chillón sin previo tratamiento alguno. Por lo que existe la necesidad de buscar alternativas de tratamiento y reutilización de estos residuos semisólidos para evitar que se siga contaminando el río.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿En qué medida la pirólisis de lodos residuales de acuicultura influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿En qué medida la temperatura de pirólisis influye en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón?

- ¿En qué medida la temperatura de pirólisis influye en la fitotoxicidad del biocarbón?

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar la influencia de la pirólisis de lodos residuales de acuicultura en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.

#### **1.3.2 Objetivo específico**

- Determinar la influencia de la temperatura de pirólisis en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.
- Determinar la influencia de la temperatura de pirólisis en la fitotoxicidad del biocarbón.

### **1.4 Justificación**

#### **1.4.1 Justificación teórica**

Se han realizado diversas investigaciones utilizando lodos residuales de PTAR y algunos casos lodos de plantas de tratamiento de potabilización para la producción de biocarbón (Agrafioti et al. 2013). Sin embargo, producto de la revisión bibliográfica realizada, muy poco se ha indagado acerca de las propiedades que pueda tener un biocarbón producido a partir de lodos residuales de acuicultura. Es así que, la presente investigación contribuirá a reducir la falta de conocimiento en este ámbito.

#### **1.4.2 Justificación metodológica**

La metodología aplicada para la obtención y análisis del biocarbón de lodos residuales de acuicultura que plantea la investigación, podrá ser replicada en futuras investigaciones de modo que sea posible realizar comparaciones con los resultados obtenidos y/o realizar aplicaciones sobre suelos.

#### **1.4.3 Justificación ambiental**

La descarga de lodos residuales con alto contenido en nutrientes, como lo son los provenientes de la acuicultura (Summerfelt, Adler, Glenn 1998), sin

algún tipo de tratamiento sobre los cuerpos de agua; producen diversos efectos adversos sobre la calidad del agua, la vida silvestre y el desarrollo de la actividad humana (Chen, Coffin, Malone 1997). Frente a ello, mediante la presente investigación, se estudia una alternativa de tratamiento y reutilización de estos lodos residuales para la producción de biocarbón.

## **1.5 Delimitantes de la investigación**

### **1.5.1 Delimitante teórica**

Para determinar la calidad del biocarbón como enmienda del suelo se tomarán en consideración los parámetros establecidos por la International Biochar Initiative (IBI) y European Biochar Certificate (EBC).

### **1.5.2 Delimitante temporal**

La investigación se llevará a cabo en los meses de mayo hasta agosto del año 2023.

### **1.5.3 Delimitante espacial**

La investigación se desarrollará en el laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales (FIARN) de la Universidad Nacional del Callao (UNAC). El lugar de muestreo de lodos residuales será en la piscigranja Pariamarca, ubicada en Canta, Lima.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Internacionales

Videgain-Marco et al. (2020) desarrollaron su investigación en el Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural de la Universidad de Zaragoza – España, con el objetivo de estudiar la influencia de diferentes factores como la temperatura final de pirólisis, la tasa de aplicación de biocarbón y la textura del suelo en las variables de respuesta de cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Los investigadores utilizaron sarmientos de vid (*Vitis vinifera* L.) como materia prima para la producción, los cuales fueron recolectados durante la poda de invierno en un viñedo ubicado en Aragón - España. El proceso de pirólisis para la producción de biocarbón se llevó a cabo a temperaturas de 400 y 600 ° C (B400 y B600) y a presión atmosférica. Posteriormente se realizaron análisis proximales y elementales para cada biocarbón y evaluaron la fitotoxicidad siguiendo la metodología propuesta por Zucconi. Esta última se realizó para cinco especies diferentes: berro (*Lepidium sativum*, L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.), albahaca (*Ocimum basilicum* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L.). Los resultados que B600 tenía un mayor contenido de cenizas y carbono fijo en comparación con B400, que a la inversa tenía una mayor cantidad de materia volátil. Las fracciones de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno disminuyeron al aumentar la temperatura final de pirólisis para ambos biocarbón. El rendimiento en masa promedio de biocarbón disminuyó notablemente cuando aumentó la temperatura final de pirólisis. En cuanto al análisis de fitotoxicidad, B600 resultó tener una fitotoxicidad moderada en los índices de germinación (IG) de berro y lechuga; se reportaron efectos fitoestimulantes (IG > 100%) en lechuga y albahaca con B400. No se encontraron efectos adversos del biocarbón en la germinación del sorgo tanto en B600 como B400. Los investigadores concluyeron que los sarmientos de vid representan un recurso interesante para la producción de biocarbón, debido a su fácil manejo y lento proceso de pirólisis, y el aspecto más importante, las propiedades

fisicoquímicas apropiadas de los biocarbón resultantes. Así mismo, solo se encontraron efectos fitotóxicos moderados sobre las semillas en B600.

Zhang, Qin, Yi (2020) en su investigación desarrollada en la Universidad Tecnológica de Nanyang (Singapur) y la Universidad de Tongji (China); elaboraron biocarbón e hidrochar mediante un proceso de pirólisis y carbonización hidrotermal respectivamente, aplicando temperaturas de 300, 500 y 700 °C. Los investigadores caracterizaron los chars para determinar sus posibles aplicaciones ya sea como combustible sólido, adsorbente, almacenador de carbono o sustrato para el cultivo del suelo. Utilizaron como materia prima lodo de agua dulce proveniente de una planta de potabilización de agua. Para determinar las posibles aplicaciones del biocarbón e hidrochar realizaron análisis de las propiedades fisicoquímicas (pH, área superficial, área y volumen del poro), análisis de elementales (C, H, N, S, O), análisis proximales (humedad, materia volátil, ceniza, carbono fijado), fitotoxicidad (a través de un ensayo de germinación de semillas de trigo utilizando como sustrato un extracto o lixiviado de biocarbón) y otros análisis. Sus resultados demostraron una disminución del rendimiento de producción de biocarbón con el aumento de la temperatura en el rango de 43.18% a 60.18 %, el pH del biocarbón producido aumentó de 4,91 a 7,78 con el aumento de la temperatura de pirólisis de 300 °C a 700 °C. Se observó también una disminución en el contenido de C, H, N y S en el biocarbón e hidrochar con el aumento de la temperatura; y los valores de IG (índice de germinación), producto de las pruebas de fitotoxicidad, fueron superiores a 200 %. Se concluyó que los lodos, biocarbón e hidrochar tienen un enorme potencial como enmiendas del suelo debido a sus efectos positivos sobre la germinación, crecimiento de las semillas de trigo y a su alta estabilidad de carbono.

Velázquez et al. (2019) en la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, México; desarrollaron una investigación con el objetivo de analizar un biocarbón obtenido a partir de lodo residual de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ubicada en Morelia, Michoacán, México para su uso potencial como mejorador de suelos agrícolas. Los lodos residuales secos fueron sometidos a pirólisis en un reactor de pirólisis diseñado para operar con energía solar térmica, con seis tiempos de residencia (0.5 - 4 h), temperatura

de 280 - 355 °C. Los investigadores analizaron sobre el biocarbón parámetros que incluyeron el pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), densidad aparente, % humedad, componentes elementales (C, N, O), micronutrientes (Fe, Mn, Cu), Metales tóxicos (Ni, Cr, Cd y Pb), entre otros. Se obtuvieron valores de pH cercanos a la neutralidad (6.33 - 7.33) que no se vieron por los tiempos de residencia durante la pirólisis, la CE varió de 5240 a 592  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y disminuyó significativamente con el aumento del tiempo de residencia. Así mismo, la MO varió de 5.7 a 3.95%, disminuyendo significativamente con los tiempos de residencia, la concentración de micronutrientes disminuyó también debido a la pirólisis. El contenido de C (31 a 38%) fue semejante al encontrado por otros autores para biocarbón de lodos residuales obtenidos en condiciones de pirólisis similares. Finalmente, el contenido de N estuvo en el rango de 6.5 a 7.7% y los metales tóxicos se encontraron por debajo de los límites dispuestos en la normativa mexicana. De acuerdo a los resultados obtenidos los investigadores concluyeron que el biocarbón producido podría recomendarse para su disposición en suelos con pH neutro o ligeramente alcalino, y con ello inmovilizar los metales tóxicos fijados en el biocarbón. Para su posible uso en suelos agrícolas recomendaron realizar estudios en plantas cultivadas y observar su respuesta.

Phoungthong, Zhang, Shao y He (2018) elaboraron biocarbón en el “Laboratorio de Control de la Contaminación y Reutilización de Recursos” de la Universidad de Tongji - Shanghai – China, con el objetivo principal de evaluar el riesgo ambiental de su uso en suelos para fines agrícolas, realizando pruebas de ecotoxicidad de lixiviados de biocarbón. Los investigadores utilizaron como materia prima lodo deshidratado de una PTAR municipal ubicada en Shanghai, China y produjeron biocarbón a diferentes temperaturas de pirólisis (300 - 900 °C). Determinaron los comportamientos de lixiviación de los biocarbón bajo diversas condiciones, incluidos los tipos de solventes (agua desionizada, solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  /  $\text{HNO}_3$  y solución de ácido acético), y analizaron los efectos fitotóxicos de estos lixiviados sobre semillas de trigo (*Triticum aestivum L.*) a través de un índice de germinación (IG). En los resultados, se observó que el contenido de metales pesados en el biocarbón fue mayor que en los lodos de

PTAR y aumentaron con la temperatura de pirólisis. Los IG de los lixiviados generados a partir de agua desionizada y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / HNO<sub>3</sub> aumentaron a medida que la temperatura de pirólisis aumentó de 400 a 500 ° C y luego disminuyó ligeramente cuando la temperatura aumentó de 500 a 900 ° C. No obstante, las semillas de trigo no germinaron en el lixiviado de ácido acético. A partir de lo reportado concluyeron que el biocarbón producido es un fijador eficaz y respetuoso con el medio ambiente para la inmovilización de metales pesados presentes en lodos de PTAR. Además, estas concentraciones fueron significativamente más bajas que los valores límites para la aplicación sobre la tierra establecidos en la normativa China. Por lo tanto, los biocarbón producidos podrían emplearse en diversas aplicaciones, como usos agrícolas. El biocarbón producido a 500 °C tuvo un efecto positivo en el IG, lo que indica que este biocarbón podría mejorar la fertilidad del suelo.

Liang et al. (2016) desarrollaron una investigación en Facultad de Ciencias Ambientales y de Recursos de la Universidad Zhejiang A & F en China, la cual consistió en estudiar biocarbón obtenido a partir de residuos de la poda los cuales fueron recolectados de parques y jardines de la ciudad de Madrid – España. El biocarbón se produjo a temperatura de pirólisis de 300 °C (BC300) y 500 °C (BC500). Sobre ellos se realizaron análisis proximales para determinar la humedad, materia volátil (MV), carbón fijado (CF) y cenizas y se determinaron parámetros fisicoquímicos como pH y conductividad eléctrica (CE). Además, se realizó una prueba de fitotoxicidad aplicando la metodología descrita por Zucconi et al. (1981) la cual consistió en ensayos de germinación de semillas de berro, tomate, lenteja o lechuga sobre un lixiviado de biocarbón. Los resultados más relevantes comprenden el rendimiento de producción de biocarbón el cual disminuyó con la temperatura de pirólisis (55% - 36%), el pH del residuo de poda aumentó después del tratamiento térmico. Además, se reportó una disminución del C orgánico tras la pirólisis de este residuo. Con respecto al análisis proximal, se observó que a medida que aumentaba la temperatura de pirólisis, la materia orgánica del biocarbón se volvió más recalcitrante (disminución del carbono lábil). Las tasas de germinación (IG) de berros y lechugas no se vieron afectadas por el tipo de enmienda utilizada, con valores de IG que variaron de 91 a 119%

para berros y de 123 a 164% para lechugas. Para las lentejas, el índice de germinación en los extractos de B500 fue del 95% del valor en el control, y este valor fue estadísticamente significativamente mayor que para el residuo de poda (P) que tuvo un índice de germinación del 69% (indicativo de fitotoxicidad moderada). El IG fue del 80% para B300, lo que indica una falta de fitotoxicidad en las lentejas. Para el tomate, el índice de germinación fue de 114 y 82% para B300 y B500 respectivamente, lo que indica fitoestimulación para B300 y un efecto neutro para B500. Por el contrario, el IG fue solo del 41% para el residuo de poda, lo que sugiere una alta fitotoxicidad. Este estudio demostró que los residuos de poda con un contenido de polifenoles relativamente alto pueden transformarse en un producto útil mediante pirólisis. Por otro lado, no hubo rastro de fitotoxicidad causada por la adición de residuos de poda luego de su transformación en biocarbón. El biocarbón tuvo un efecto fitoestimulante para algunas de las especies de plantas analizadas.

### **2.1.2 Nacionales**

Girón (2020) desarrolló un trabajo de tesis en la Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente de la Universidad Nacional del Centro del Perú, el cual tuvo como objetivo determinar el tiempo de pirólisis y la especie forestal óptima para la producción de biocarbón con fines de enmienda; para ello usó tres tiempos de pirólisis (2 horas, 3 horas y 4 horas), y tres especies forestales: *Erythrina ulei* Harms (Pisonay), *Miconia amazonica* Triana (Pomarrosa) y *Cecropia ficifolia* aff. Warb. ex Snethl. (Cetico), las cuales fueron extraídas de parcelas agrícolas en el distrito de Carabaya, Puno. La materia prima fue reducida en tamaño para facilitar su secado, el cual fue monitoreado por 2 meses. Sobre el biocarbón producido se evaluaron los siguientes parámetros: contenido de humedad, conductividad eléctrica, fitotoxicidad (mediante un ensayo de inhibición de germinación con semillas de lechuga, rabanito y trébol), materia volátil, contenido de cenizas, contenido de carbono fijo y rendimiento de producción. Los resultados de la investigación evidenciaron que el rendimiento de producción entre las especies utilizadas estuvo en el rango de 9.03% – 15.92% observándose un mayor rendimiento al disminuir el tiempo de pirólisis. El contenido de humedad fue directamente proporcional con el tiempo de

pirólisis, obteniéndose el valor más alto (8.3728 %) a las 4 h. La conductividad eléctrica registró el mismo comportamiento obteniéndose el mayor valor (854.12 uS/cm) a un tiempo de pirólisis de 4 h. No obstante, el pH alcanzó su valor más alto (9.95) a un tiempo de pirólisis de 2 h. En la prueba de fitotoxicidad se observó que *E. ulei* presenta características que inhiben el desarrollo de las semillas; caso contrario es el de *C. ficifolia* y *M. amazonica* que mejoraron sustancialmente la cantidad de semillas germinadas en comparación al testigo. El contenido de material volátil y cenizas del biocarbón registró su valor más alto (19.183% y 17.969% respectivamente) en el tiempo de pirólisis de 4 h. Por otro lado, el contenido de carbono fijo más alto (70.602%) se obtuvo a un tiempo de pirólisis de 2 h. El investigador concluyó que los diferentes tiempos de pirólisis afectan al rendimiento de producción en relación inversamente proporcional y que existe una relación inversamente proporcional entre el contenido de carbono fijo del biocarbón con el contenido de material volátil y el contenido de ceniza. Además, que la conductividad eléctrica presenta relación inversamente proporcional con el número de semillas germinadas en la prueba de fitotoxicidad. Finalmente, el tiempo de pirólisis óptimo para la producción de biocarbón con fines de enmienda fue el de 2 horas, ya que aseguró un mayor rendimiento de producción y mayor contenido de carbono fijo.

La Serna y Sanz (2020) desarrollaron una investigación en la Universidad Nacional de Jaén con el objetivo de comparar biocarbón producido a partir de biomasa residual de tres variedades de *Theobroma cacao L.*, las muestras se recolectaron de un vivero cacaotero ubicado en Santa Cruz del distrito de Bellavista – Jaén – Cajamarca. Estas se trituraron en pequeñas fracciones y fueron puestas a secar al aire libre por 7 días. Luego fueron sometidas a un proceso de pirólisis utilizando una cámara de combustión, la temperatura se encontró entre los 500 a 540 °C y durante un tiempo aproximado de dos horas y media a tres horas. El biocarbón obtenido se sometió a análisis de pH, análisis de macro – micronutrientes (N, K, Ca, Mg y P) y análisis del rendimiento de producción. En los resultados, se observaron diferencias significativas entre los rendimientos de las tres variedades de *Theobroma cacao L.*, estos se encontraron en el rango de 42.9 % - 61.52 %. Con respecto a la conductividad

eléctrica, se observaron valores de entre los 42.1 a 57.17 dS/m. El pH del biocarbón no presentó diferencias significativas entre los tres tratamientos, estos variaron entre los 9.97 a 10.23. El contenido de N entre las tres variedades presentó valores entre los 0.427 – 1.57 %. Los investigadores concluyeron que el biocarbón producido se encontraba en la escala de fuertemente alcalinos.

Palacios (2019) realizó un trabajo de tesis en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina con el objetivo principal evaluar la calidad y estabilidad de un biocarbón producido a partir de residuos de podas de las 5 especies más abundantes en el campus de esta universidad. Las muestras se sometieron a un proceso de secado (105°C por 24 horas) previo al proceso de pirólisis lenta, este último se llevó a cabo a las temperaturas de 300 °C y 500°C por 5 horas, dos horas de calentamiento y tres horas de pirólisis. El biocarbón obtenido pasó por un proceso de separación por tamaño de partículas para evaluar la distribución de estas. Los análisis posteriores incluyeron un análisis gravimétrico, análisis elemental (C, N y H), determinación de carbono inorgánico, determinación de la estabilidad de biocarbón (mediante análisis del carbono lábil, relación H: C<sub>org</sub>, entre otros), análisis de pH y conductividad. Los resultados mostraron que el rendimiento a 300°C fue en promedio 39.03 % mientras que, a 500°C se obtuvo un valor de 32.55 %, la humedad registro un incremento con la temperatura de pirólisis, a 300°C fue de 3.308 %; mientras que, a 500°C se obtuvo un 3.575 %. El contenido carbono orgánico (C<sub>org</sub>) en ambos biocarbón presentó un valor superior al 60 %, lo que lo clasifica como “biocarbón de primera clase”. Los valores de la relación H:C<sub>org</sub> de ambos biocarbón superaron el límite de 0.7 lo que los clasifica como “aptos” y se observó un aumento con el incremento de la temperatura. El contenido de cenizas a 500°C fue de un 17.159 %; mientras que, a 300°C el porcentaje disminuyó a 15.410 %. La concentración de N en el biocarbón producido a 300 °C fue de 1.029 %; mientras que a 500°C la concentración disminuyó a 0.866 %. El pH de todos los biocarbón producidos fue mayor a 8.263, aumentando su valor a mayor temperatura de pirólisis. A mayor temperatura se evidenció una mayor conductividad o salinidad, a 300°C se obtuvo una conductividad de 1.633 dS/m, mientras que, a 500°C 2.013 dS/m. A 300°C el porcentaje de carbonatos fue de

2.157 %; mientras que a 500°C la concentración se incrementó a 6.814 %. La distribución de partículas no presentó una determinación no se vio afectada por la temperatura o la especie. Se observó una disminución del contenido de carbono lábil con el incremento de la temperatura, a 300°C se obtuvo un 14.886 %; mientras que a 500°C el valor fue de un 9.675 %. La tesis concluyó que el biocarbón producido era de primera calidad y estable, presentando una mayor estabilidad a mayor temperatura de pirólisis. Así mismo, consideraron al biocarbón producido como una enmienda alcalina.

Lloclla y Lopez (2019) desarrollaron una investigación en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes con el objetivo de evaluar el efecto de un biocarbón producido a partir de residuos sólidos orgánicos, sobre la germinación y crecimiento de plantas forestales como *Ceiba trichistandra* y *Bursera graveolens*. Se recolectaron residuos sólidos orgánicos del mercado central ubicado en la provincia de Tumbes para la producción de biocarbón. La materia prima fue sometida a un pretratamiento (secado y molienda) y luego colocada en un equipo de carbonización a una temperatura de 600 °C, durante un tiempo de 2 horas. Se analizaron parámetros texturales, humedad, cenizas y pH. Además, se realizó una prueba de germinación de semillas de *Ceiba trichistandra* y *Bursera graveolens*. Para ello se prepararon sustratos a partir de tierra agrícola y un porcentaje de biocarbón: Sustrato T0 (sin biocarbón), Sustrato T1 (5% de biocarbón), Sustrato T2 (10% de biocarbón). El rendimiento de la producción de biocarbón en base a la materia prima seca fue de 24,4%, la humedad relativa fue de un 4.49 %, contenido de cenizas fue de 7.78 % y el pH carga cero se encontró en 7.98. Se observó que en el sustrato T0 se obtuvo un porcentaje de germinación de entre 30 y 45 %. Mientras que en los tratamientos con 5 y 10 % de biocarbón (T1 y T2) se obtuvieron valores de entre 40 y 70%, ello en las semillas de *Ceiba trichistandra*. En *Bursera graveolen* no hubo germinación. Los investigadores concluyeron que la pirolización de materia orgánica residual del mercado modelo de Tumbes, produce un biocarbón con área superficial muy baja, con pH carga cero moderadamente básico. Así mismo, la presencia de biocarbón tiene efectos positivos en la germinación de *Ceiba trichistandra* esta especie. El efecto de la presencia de biocarbón en los sustratos

sobre la germinación de la especie *Bursera graveolens* no pudo ser medida, dado que ni siquiera las muestra sin biocarbón germinaron. Esto es debido a que esta especie tiene un % bajo de germinación cuando la propagación es sexual.

Trujillo (2017) en su investigación realizada en la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional Agraria La Molina, produjo el biocarbón a partir de residuos orgánicos avícolas para evaluar y comparar su calidad en base a su composición, características y propiedades fisicoquímicas. Los residuos orgánicos avícolas de gallinaza y pollinaza utilizados provinieron de dos granjas avícolas de la empresa San Fernando S.A. ubicados en el distrito de Huaral y Lurín. Los residuos fueron sometidos a un proceso de pirólisis a temperaturas de 519 a 556 °C en un horno pirolítico por un tiempo total de 2.5 a 3 horas. La materia prima utilizada y el biocarbón resultante fueron analizados para conocer sus características morfológicas y estructurales, también se analizaron otros parámetros como la densidad aparente, rendimiento del biocarbón, composición elemental, contenido de cenizas, humedad, nutrientes y pH. Finalmente se aplicó una prueba de toxicidad con semillas de rábano de la especie *Raphanus sativus* L., para evaluar los efectos fitotóxicos del biocarbón a 4 concentraciones (1%, 3%, 5%, y 7%) sobre el proceso de germinación de las semillas y en el desarrollo de las plántulas durante 10 días. Los resultados obtenidos mostraron que el rendimiento de los residuos orgánicos de gallinaza (64.31%) era mayor que de la pollinaza (43%) y la mezcla de ambos (55.14%). El contenido del carbono orgánico del biocarbón de la pollinaza (9.48 g/100g) fue mayor que los biocarbones de la mezcla (5.27 g/100g). Los datos de los valores del pH tuvieron una distribución homogénea entre los tratamientos (10.01 - 10.89). El contenido de humedad del biocarbón de la pollinaza (1.80%) fue mayor que el de la mezcla del biocarbón gallinaza-pollinaza (1.40%) y de la gallinaza (0.70%). El contenido de cenizas en el biocarbón de la gallinaza (82.02 g/100 g) fue superior al de pollinaza (54.65 g/100 g). El contenido de N total del biocarbón de pollinaza (2.05 g/100 g) fue superior que el de gallinaza (1.05 g/100 g) y de la mezcla (1.34 g/100 g). El índice de germinación en todos los tratamientos con biocarbón de gallinaza fue superior a 109.61%. El investigador concluyó que el biocarbón producido era fuertemente alcalino. Además, que el índice de germinación resulta significativo

para dosis del 3% en biocarbones de gallinaza (80.06%) y en dosis del 1% en el biocarbón de pollinaza (62.82%).

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Lodos residuales**

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) define a los lodos residuales como un excedente o sobrante sólido o semisólido inutilizable, resultante de procesos de tratamiento de aguas residuales o procesos industriales (European Environment Agency no date). Es decir, estos no se producen con algún propósito, y en algunos casos representan un subproducto del cumplimiento a un requisito legal (Kroiss 2004).

Los lodos residuales generalmente se generan durante procesos de tratamiento que incluyen vías físicas como la floculación, sedimentación, entre otros y vías biológicas como el tratamiento microbiano. Así mismo estos procesos pueden agruparse subsistemas (tratamiento primario, secundario y terciario) (Raheem et al. 2018). Los componentes de los lodos residuales están estrechamente relacionados con los componentes del agua residual a tratar (Kroiss 2004).

Los componentes de lodos residuales se constituyen como una mezcla compleja de numerosos materiales que incluyen una parte orgánica e inorgánica y microbios en estado disuelto o suspendido. Además, contiene elementos inorgánicos valiosos como el N, P, K, Ca, S y Mg. Por otro lado, podemos encontrar contaminantes y carcinógenos potenciales como metales pesados, dioxinas, furanos y microbios patógenos (Raheem et al. 2018).

Algunos de los métodos usados para la eliminación de lodos residuales comprenden la disposición en vertederos, incineración, producción de cemento y compostaje (Wang et al. 2004).

### **2.2.2 Lodos residuales de acuicultura**

La acuicultura consiste en el cultivo de organismos acuáticos en ambientes controlados para propósitos comerciales. Los procesos de reproducción, crianza y cosecha de estos organismos se llevan a cabo en todo

tipo de entornos acuáticos como estanques, ríos, lagos, océanos y sistemas artificiales (National Oceanic and Atmospheric Administration 2011). Las actividades de la acuicultura de acuerdo a la Ley General de la Acuicultura comprenden la selección y acondicionamiento del medio, la producción u obtención de la semilla, la siembra, el cultivo, la cosecha, el procesamiento primario y finalmente, la investigación e innovación tecnológica (Ministerio de la Producción 2016).

Los lodos de la acuicultura están conformados por todos aquellos materiales utilizados durante los procesos de la acuicultura y que no se eliminan del sistema durante la recolección o cosecha. Estos materiales consisten principalmente en heces de pescado, alimento no consumido y poblaciones de bacterias. Siendo estos de naturaleza orgánica y ricos en nutrientes. Pueden estar presentes también otro tipo de materiales como productos químicos o terapéuticos no consumidos y peces muertos (Chen, Coffin, Malone 1997).

#### **2.2.2.1 Disposición de lodos en la acuicultura**

Los lodos de la acuicultura se pueden disponer en tierra, ya sea como lodo crudo después de ser concentrado en un clarificador o como lodo estabilizado proveniente de una laguna de estabilización (Chen, Coffin, Malone 1997). Este enfoque de gestión es uno de los más simples y comunes que se aplican en piscigranjas. Sin embargo, la aplicación directa de este tipo de lodos al suelo presenta limitaciones. La primera es el olor, que imposibilita su aplicación en zonas pobladas. En segundo lugar, lodos aplicados al suelo necesitan ser arados, ya que estos tienden a formar costras o capas que pueden imposibilitar el crecimiento de las plantas. La tercera es la lenta tasa de liberación de nitrógeno, el 90 % del nitrógeno total se encuentra en forma orgánica; por lo que requiere de la acción de los microorganismos para volverlo disponible. En consecuencia, solo un tercio de los nutrientes presentes en el lodo se pueden utilizar durante el primer año (Chen, Coffin, Malone 1997).

### **2.2.2.2 Impactos ambientales de los lodos de la acuicultura**

Dependiendo del uso que se dé al lodo o sus subproductos, el impacto ambiental variará. Está ampliamente documentado que la liberación de efluentes (lodos y aguas residuales) de la acuicultura en cuerpos de agua genera procesos eutrofización debido al contenido de N y P que presenta. Así mismo, los patógenos que pueden estar presentes en el lodo pueden infectar poblaciones de peces silvestres. Por otro lado, debido a su contenido de nutrientes (N y P) y materia orgánica, estos pueden ser devueltos a la tierra para fertilizar cultivos teniendo por tanto un impacto ambiental positivo. No obstante, algunos lodos pueden contener metales pesados y/o patógenos lo que pueden limitar su aplicación como fertilizante de cultivos. (del Campo et al. 2010).

En caso los lodos no presenten metales pesados y/ patógenos, es fundamental tener en consideración que la cantidad de lodo aplicada al suelo no debe proporcionar más N disponible que el que necesitan los cultivos, a fin de evitar la contaminación de aguas subterráneas con nitrato (Chen, Coffin, Malone 1997).

De manera resumida, para optimizar el uso de lodos de la acuicultura como fertilizante y minimizar sus impactos ambientales, es fundamental conocer su contenido de nutrientes y la disponibilidad de estos; así como el contenido de metales pesados y patógenos (del Campo et al. 2010).

### **2.2.2.3 Tratamiento y reutilización de lodos residuales**

La eliminación de lodos residuales en vertederos es una práctica bastante común; sin embargo, esta tiene muchas desventajas como el requerimiento de monitoreos a largo plazo, especialmente por la lixiviación de amoníaco (Kroiss 2004). Debido a ello, se han realizado investigaciones en búsqueda de alternativas de tratamiento y reutilización de lodos residuales, las cuales se mencionan en las siguientes líneas:

#### **a. Compostaje de lodos**

Este tratamiento permite mejorar la estabilidad de la materia orgánica e inactiva patógenos y parásitos presentes en el lodo residual. En el compostaje

convencional, el material es tratado aeróbica y anaeróbicamente durante un mes. Luego es “curado” y “madurado” en pilas o hileras durante algunos meses. Por lo general, la aireación se proporciona únicamente volteando periódicamente el material de compostaje. Este tipo de tratamiento tiene sus desventajas, ya que requiere de extensas áreas de terreno; lo que restringe su aplicación a gran escala en países con escasez de tierras (Wang et al. 2004).

### **b. Digestión anaerobia**

Es un tratamiento que transforma en biogás a la materia orgánica sólida presente en el lodo residual. Este proceso se lleva a cabo a través de reacciones bioquímicas en condiciones anaerobias. El biogás producido se compone en un 60 – 70 % de metano, 30 – 40 % de dióxido de carbono y cantidades trazas de otros gases (como el hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y nitrógeno). Además del biogás, la digestión anaerobia produce un digestato como producto final, el cual contiene grandes cantidades de nutrientes (N, P y K). El cual puede ser utilizado posteriormente como fertilizante y/o compost. El metano producido durante la digestión anaerobia de lodos residuales puede utilizarse en motores de gas y en la generación de electricidad o calor (Raheem et al. 2018).

### **c. Incineración**

La incineración es un proceso de oxidación exotérmica de biosólidos que tiene como productos un gas de combustión (compuesto por CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O), cenizas y calor. Este tratamiento genera una reducción del 90% del volumen del lodo residual, al mismo tiempo que elimina los patógenos presentes en él. La ceniza resultante, la cual representa aproximadamente un 30 % en peso, puede eliminarse en vertederos o utilizarse para la producción de materiales de construcción. Así mismo, el calor generado en el proceso puede ser aprovechado para la producción energía mediante turbinas de vapor (Raheem et al. 2018).

Pirólisis: Es un proceso de conversión térmica (350 – 900 °C), realizada en un ambiente con deficiencia de oxígeno; el cual genera vapores o gases pirolíticos. Para realizar la separación de la parte líquida, los vapores deben condensarse por enfriamiento. El producto sólido generado es llamado biochar o biocarbón, mientras que la parte líquida es conocida como bioaceite. La cantidad y calidad de los productos líquidos, gaseosos y sólidos (carbonizado) dependen de las

condiciones del proceso que incluyen la temperatura de funcionamiento, el tiempo de reacción y presión; así como las características del lodo residual usado como materia prima. A diferencia de la incineración, el proceso de pirólisis se lleva a cabo en condiciones de déficit de oxígeno, produciéndose en su mayoría reacciones endotérmicas que consumen energía (alrededor de 100 kJ kg<sup>-1</sup>) (Raheem et al. 2018).

#### **d. Gasificación**

La gasificación convierte a los lodos residuales secos en gases combustibles conocidos como gas de síntesis (compuesto principalmente por H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), mediante un proceso de oxidación parcial; el cual ocurre a temperaturas elevadas de 700 – 1000 °C. La gasificación reduce el volumen del lodo y fija los metales pesados en el residuo sólido generado al final del proceso. El tratamiento por gasificación incluye cuatro etapas: (i) secado, (ii) pirólisis o desvolatilización, (iii) combustión y (iv) gasificación o reducción del carbón (Raheem et al. 2018).

#### **2.2.3 Biocarbón**

El biocarbón o biochar es un material sólido, poroso y con un alto contenido de carbono que se obtiene a partir de la conversión termoquímica de la biomasa en un ambiente limitado de oxígeno (Chen et al. 2020). La historia del biocarbón se remonta a 1990, con el descubrimiento de un tipo de suelo de origen antropogénico hallado en la amazonia del Brazil llamado "*Terra Petra Do Indio*", este suelo se caracterizaba por contener un alto contenido de materia orgánica y estructuras aromáticas. El estudio de este tipo de suelo, determinó que la aplicación de "*Terra Petra Do Indio*" mejoraba la fertilidad de suelos poco productivos (Zech, Haumaier, Hempfling 1990). Investigaciones posteriores sobre "*Terra Petra Do Indio*" determinaron que este contenía 70 veces más carbón que suelos circundantes a él. Este carbón provenía de la quema incompleta de residuos de cocina que realizaban las comunidades y que debido a su estructura aromática policíclica y estabilidad química persisten en el ambiente por siglos, siendo un gran aporte de materia orgánica al suelo; lo que se traduce en suelos con mayor fertilidad (Glaser et al. 2001). Es así como, el enriquecimiento del suelo mediante la adición de carbón se convirtió en una

alternativa de bajo costo para la mejora de la fertilidad del suelo. Sin embargo, la quema incompleta de biomasa para la producción de carbón conlleva a la liberación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero. La carbonización de la biomasa por otro lado, evita la liberación de estos gases al medio ambiente, realizando el calentamiento del material en ausencia de oxígeno (FAO no date). En la actualidad el carbón es usado como combustible sólido para la producción de energía. El biocarbón en cambio se utiliza para el secuestro de carbono y acondicionamiento del suelo (Lee, Sarmah, Kwon 2018).

#### **2.2.2.4 Propiedades fisicoquímicas del biocarbón**

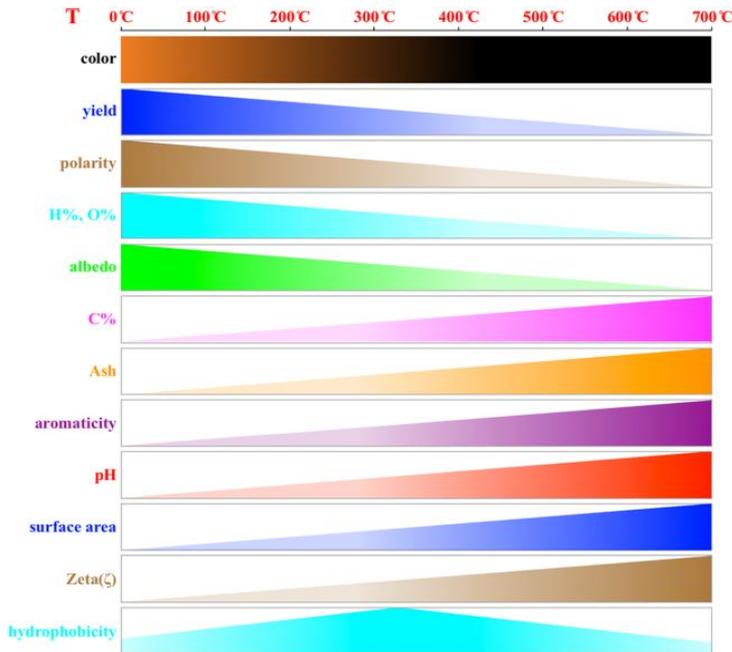
Todas las propiedades del biocarbón son el resultado del tipo de materia prima o biomasa utilizada y de las condiciones de pirólisis (temperatura, tiempo de retención, entre otros) (Weber, Quicker 2018).

Durante el proceso de pirólisis, la estructura de la biomasa es alterada en muchas maneras, estos cambios son los que influyen en las propiedades del biocarbón producido. Las propiedades básicas del biocarbón varían con la temperatura de pirólisis, como se muestra en la Figura 1 (Xiao et al. 2018).

Con el aumento de la temperatura de pirólisis (100 - 700 °C), el color de la biomasa cambia de su color original a negro, el rendimiento de producción, la polaridad, contenido de hidrógeno (H%), contenido de oxígeno (O%) y albedo del biocarbón disminuye. En contraste, el contenido de carbono (C%), porcentaje de cenizas, aromaticidad, pH, área de la superficie y potencial zeta ( $\zeta$ ) se incrementa con el aumento de la temperatura de pirólisis (100 - 700 °C). La hidrofobicidad del biocarbón aumenta y luego disminuye con la temperatura de pirólisis. Estudios recientes muestran que las superficies aromáticas son levemente hidrófilas; sin embargo, contaminantes como los hidrocarburos son adsorbidos proporcionando hidrofobicidad a las superficies aromáticas en el rango de temperatura media (Xiao et al. 2018).

**Figura 1**

*Variación de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón con el aumento de la temperatura de pirólisis*



*Nota.* yield (rendimiento de producción), polarity (polaridad), aromaticity (aromaticidad), surface área (área superficial), hydrophobicity (hidrofobicidad). Adaptado de “Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review” (p. B), por (Xiao et al. 2018), Environmental Science and Technology, 52(9)

### 2.2.2.5 Calidad del biocarbón

La calidad del biocarbón está determinada por las propiedades fisicoquímicas del biocarbón que afectan su uso como mejorador de las funciones del suelo y reductor de emisiones de la biomasa mediante el secuestro de carbono (International Biochar Initiative 2015). Estas a su vez, condicionan la capacidad del biocarbón para mejorar las propiedades químicas y biológicas del suelo, suministrar nutrientes a las plantas, aumentar el rendimiento de los cultivos, adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos como pesticidas y metales pesados, secuestrar carbono en el suelo y reducir las emisiones de GEI del suelo (Brassard et al. 2019).

Actualmente existen dos programas de certificación voluntarios a los que pueden acceder los productores de biocarbón: International Biochar Initiative

(IBI) y European Biochar Certificate (EBC). La International Biochar Initiative (2015) define tres categorías de pruebas o test (A, B y C) para biocarbón aplicado como enmienda de suelo. En la categoría A, las características básicas del biocarbón que deben ser analizadas incluyen, las propiedades físicas (tamaño de partícula y humedad), propiedades químicas (H, C y contenido de N), contenido de ceniza, conductividad eléctrica (CE) y pH. Sin embargo, solo se establecen criterios para el contenido de carbono orgánico y la relación H:C<sub>org</sub> (Tabla 1). Es importante señalar que, solo la IBI acepta a los lodos residuales como materia prima para la producción de biocarbón. La EBC es aplicable solo a biocarbón producido a partir de biomasa vegetal.

**Tabla 1**

*Parámetros básicos para determinar la utilidad de un biocarbón*

Parámetro	Unidad	IBI	EBC
Contenido de humedad	%	Declaratorio Mínimo 10%	Declaratorio
Contenido de carbono orgánico (C <sub>org</sub> )	% de masa total, base seca	Clase 1: ≥60% Clase 2: ≥30% y <60% Clase 3: ≥10% y <30%	Declaratorio
Relación H:C <sub>org</sub>	Relación molar	< 0.7	< 0.7
Relación O:C <sub>org</sub>	Relación molar	- *	< 0.4
Contenido de ceniza	%	Declaratorio	Declaratorio
Nitrógeno total	%	Declaratorio	Declaratorio
pH	-	Declaratorio	Declaratorio
Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/m	Declaratorio	Declaratorio
Distribución del tamaño de partícula	% <0.5 mm;		
	% 0.5-1 mm;		
	% 1-2 mm;		
	% 2-4 mm;		
	% 4-8 mm;	Declaratorio	- *
	% 8-16 mm;		
	% 16-25 mm;		
	% 25-50 mm;		
	% >50 mm		

*Nota.* \* Parámetro no contemplado en la guía. Los criterios de toma de muestra y métodos de medición se encuentran especificados en las guías de ambas certificaciones. Adaptado de International Biochar Initiative (2015) y European Biochar Foundation (2023).

### **a. Contenido de humedad**

El contenido de humedad puede variar mucho entre diferentes biocarbón, ya que depende por ejemplo del tratamiento post producción (como el uso del agua para el enfriamiento) (Shackley et al. 2016). La European Biochar Foundation (2023) recomienda que durante la post producción (transporte y empaquetamiento) el biocarbón debe estar lo suficientemente húmedo a fin de evitar la generación y liberación de polvo. Sin embargo, no establece un valor de porcentaje de humedad concreto. Su determinación se realiza por análisis proximal (International Biochar Initiative 2015).

### **b. Grado de estabilidad**

El grado de estabilidad consiste en la resistencia a la degradación microbiana y oxidación biótica que presenta el biocarbón. Esta recalcitrancia, asegura la perdurabilidad del biocarbón en los ecosistemas, de esta manera los beneficios del que este aporta al suelo pueden perdurar por más tiempo (Lehmann, Gaunt, Rondon 2006). El alto contenido de carbonos cíclicos de alta aromaticidad y bajos niveles de H y O en el biocarbón, son los que le confieren esta resistencia a la degradación de los microbios presentes en el suelo (Sharma 2018).

De acuerdo a Xiao et al. (2018), se han planteado hasta el momento cinco métodos de evaluación del grado de estabilidad del carbono presente en un biocarbón los cuales incluyen, el método de la relación  $H/C_{org}$  y  $O/C_{org}$ , métodos físicos, químicos, biológicos y termodinámicos. Tanto la International Biochar Initiative (2015) como la European Biochar Foundation (2023) utilizan a la relación  $H/C_{org}$  y  $O/C_{org}$  como metodología de evaluación para determinar el grado de carbonización y por ende la estabilidad del biocarbón. La relación atómica  $H/C_{org}$  es también conocida como índice de aromaticidad debido a los procesos de hidrogenación y deshidrogenación que hacen que este ratio varíe. Por otro lado, la relación atómica  $O/C_{org}$  está referida al grado oxidativo del biocarbón, el cual está asociado a los procesos de oxidación/reducción (Xiao et al. 2018).

### **c. Contenido de ceniza**

El contenido de ceniza representa a la parte inorgánica o mineral del biocarbón (Denyes et al. 2014). De acuerdo a Weber (2018), es importante conocer este parámetro en un biocarbón para poder determinar sus posibles aplicaciones. También señala que, el contenido de cenizas en un biocarbón depende en gran medida del contenido de cenizas de la biomasa usada como materia prima.

### **d. Nitrógeno total**

El Nitrógeno total en el biocarbón está compuesto por el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) y grupos de N contenidos en la materia volátil. Estos son eliminados del biocarbón a medida que aumenta la temperatura de pirólisis (Hossain et al. 2011). Aquellos biocarbón que presentan un alto contenido en amonio y nitrato pueden reemplazar a los fertilizantes sintéticos que son aplicados al suelo. Sin embargo, debe tomarse en cuenta el nivel de N presente en el suelo a fin de evitar la contaminación por nitrato de los cuerpos de agua (Sarfaraz et al. 2020).

### **e. pH**

El pH es una propiedad del biocarbón importante para aplicaciones agrícolas como la enmienda de suelo (Weber, Quicker 2018). El biocarbón dependiendo de la temperatura de pirólisis puede ser ácido o alcalino. Temperaturas bajas de pirólisis ( $< 400^\circ\text{C}$ ) generalmente producen biocarbón ácidos, mientras que la pirólisis a temperaturas altas ( $> 600^\circ\text{C}$ ) produce biocarbón alcalinos (Bista et al. 2019).

### **f. Conductividad eléctrica**

La CE nos permite conocer la cantidad de sales presentes en una solución de biocarbón (Singh et al. 2017), generalmente para la medición de CE se genera una solución de agua destilada más biocarbón y la relación de ambos componentes depende de la metodología que se utilice (Sarfaraz et al. 2020). A partir de la solución generada se miden las sales solubles presentes. La aplicación de biocarbón en el suelo en grandes cantidades y con un alto

contenido de sales puede afectar negativamente a las plantas sensibles a la sal y aumentar la salinidad del suelo (Singh et al. 2017).

#### **g. Contenido de carbono orgánico (C<sub>org</sub>)**

El carbono orgánico representa a la fracción lábil del carbono total presente en el biocarbón, el cual puede mineralizarse rápidamente cuando se aplica al suelo (aproximadamente en 108 días) (Brassard et al. 2019). La International Biochar Initiative (2015) utiliza el contenido de carbono orgánico para asignar al biocarbón en una de las tres clases (1, 2 o 3) establecidas en su guía. Muchas de las capacidades del biocarbón en aplicaciones como la enmienda de suelo, adsorción de metales pesados; entre otras, se ven influenciadas por el contenido de C<sub>org</sub> que el biocarbón pueda presentar (Brassard et al. 2019).

#### **h. Distribución del tamaño de partículas**

De acuerdo a Denyes et al. (2014), los biocarbón que contengan un mayor porcentaje de partículas gruesas (> 0.5 mm) pueden incrementar favorablemente la aireación del suelo y prevenir que con el paso del tiempo el biocarbón se desplace hacia el subsuelo; aumentando así el tiempo de los beneficios que el biocarbón ofrece para el crecimiento de las plantas. Por otro lado, señala que, biocarbón con tamaños de partículas pequeños (< 0.25 mm) se producen con fines de remediación; con el objetivo de adsorber contaminantes y minimizar su biodisponibilidad.

### **2.2.2.6 Biocarbón como enmienda del suelo**

El interés del biocarbón como enmienda de suelo surge, desde los estudios de suelos amazónicos enmendados con un material carbonoso conocido como "*Terra Petra Do Indio*", la fertilidad de estos suelos era superior a los suelos no enmendados. Actualmente, el papel del biocarbón en la mejora de la calidad del suelo se reconoce cada vez más e inclusive se recomienda como enmienda para la recuperación de suelos degradados (Brassard et al. 2019).

Los beneficios del uso del biocarbón en la agricultura incluyen la mejora de la capacidad de retención de agua, reduciendo así la demanda de riego. También la mejora en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y aumento de la capacidad de intercambio catiónico, lo que se traduce en un mejor crecimiento y productividad de las plantas (Eskandari et al. 2019; Racioppi et al. 2020).

Amplios estudios han demostrado que los efectos del biocarbón en la mejora de la fertilidad del suelo, dependen de sus propiedades físicas y químicas; las cuales abarcan la riqueza de carbón aromático, la porosidad, alcalinidad y la cantidad de nutrientes que pueda contener (Yuan et al. 2015). Para la determinación del potencial del biocarbón como enmienda de suelo, se han revisado y utilizado parámetros con criterios establecidos los cuales se presentan a continuación:

#### **a. Fitotoxicidad**

Los lodos residuales en general son subproductos inevitables del tratamiento de aguas residuales o de procesos industriales, y que si no se eliminan correctamente pueden causar problemas graves de contaminación. Durante la pirólisis, la fracción lixivable de compuestos tóxicos que pueden estar presentes en los lodos residuales disminuye; reduciéndose significativamente los riesgos ambientales asociados al uso de biocarbón derivados de este tipo de materia prima (Phoungthong et al. 2018). Sin embargo, existe aún el riesgo que el biocarbón producido pueda heredar algunas de las características indeseables de los lodos residuales como el alto contenido de metales, nitrógeno y azufre; presencia de compuestos orgánicos peligrosos; entre otros y que afecten negativamente el crecimiento de las plantas (Abrego et al. 2015).

Es por lo expuesto anteriormente, que es necesario evaluar el riesgo ambiental del uso como enmienda de suelo de los biocarbón derivados de lodos residuales. Una de las metodologías para evaluar la fitotoxicidad de un biocarbón, es la propuesta por Zucconi et al. (1981). Esta metodología ha sido aplicada para la determinación de la fitotoxicidad del biocarbón producido a partir de lodos de PTAR y se evalúa la fitotoxicidad de los lixiviados del biocarbón

mediante la germinación de semillas (Liang et al. 2016; Ronga et al. 2019; Videgain-Marco et al. 2020).

La evaluación de la fitotoxicidad de acuerdo a Zucconi et al. (1981), consiste en la generación de un lixiviado de biocarbón a partir de agua destilada (1:10). Seguidamente, se seleccionan las semillas y se incubaron en placas Petri con el lixiviado añadido. El tiempo de incubación es de 72 h y a una temperatura de 25 °C. Por último, se evalúa el porcentaje de germinación y la longitud de las raíces de las semillas germinadas. A partir de los resultados se calcula el índice de germinación:

$$IG = \frac{G}{(G_0) \times \left(\frac{L}{L_0}\right)} \times 100$$

Donde G y G<sub>0</sub> son los porcentajes de germinación del lixiviado y el control (agua destilada) respectivamente, L y L<sub>0</sub> presentan media de las longitudes de las raíces del lixiviado y el control, respectivamente. El índice de germinación (IG) es una medida que integra compuestos de baja toxicidad (que afectan el crecimiento de las raíces) y alta toxicidad (que afectan la germinación de semillas) (Liang et al. 2016).

Zucconi et al. (1981) establece los siguientes criterios para la evaluación de la fitotoxicidad a través del cálculo del índice de germinación.

**Tabla 2**

*Criterio de evaluación de la fitotoxicidad*

Fitotoxicidad	Índice de germinación
Puede ser considerado como fitonutriente o fitoestimulante	Superior 100 %
Ausencia de fitotoxicidad	Entre 100 % - 80 %
Fitotoxicidad moderada	Entre 80 % - 50 %
Fitotoxicidad alta	Menor 50 %

*Nota.* Adaptado de “Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size” (p. 2), por Liang et al. (2016), *Soil and Tillage Research*, 164

## b. Materia Volátil

De acuerdo a Denyes et al. (2014), materia volátil son todos aquellos componentes del biocarbón que son liberados durante la pirólisis. Estos componentes son por lo general, una mezcla de hidrocarburos de cadena larga y corta e hidrocarburos aromáticos con pequeñas cantidades de azufre. El contenido de materia volátil, afecta la estabilidad del biocarbón, y aplicado al suelo tiene efectos sobre la disponibilidad de N y el crecimiento de las plantas.

En teoría, los biocarbón con alto contenido de materia volátil son menos estables y tienen una mayor proporción de carbono lábil, el cual proporciona energía para el crecimiento microbiano y limita la disponibilidad del N necesario para el crecimiento de las plantas. Se considera que un 35% de materia volátil en el biocarbón es alto (lo que induce a una deficiencia de N) y un 10% de materia volátil es bajo (Denyes et al. 2014).

Para determinar la calidad del biocarbón asociada al uso como enmienda de suelo, se evaluarán los resultados obtenidos con valores referenciales encontrados durante la revisión bibliográfica que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Crterios para la evaluación del biocarbón asociada al uso como enmienda de suelo*

Indicador	Calidad asociada al uso como enmienda de suelo		Fuente
	Presenta	No presenta	
Carbono orgánico (C <sub>org</sub> )	> 10 %	≤ 10 %	IBI 2015
Relación H:C <sub>org</sub>	< 0.7	> 0.7	IBI 2015 y EBC 2023
Relación O:C <sub>org</sub>	< 0.4	> 0.4	EBC 2023
Materia Volátil	< 35 %	> 35 %	Denyes et al. 2014
Índice de germinación	> 80 %	< 80 %	Liang et al. 2016

*Nota.* IBI: Intertational Biochar Initiative, EBC: European Biochar Foundation

### 2.2.2.7 Impactos del uso del biocarbón en los suelos agrícolas

#### a. Impacto del biocarbón sobre las propiedades físicas del suelo

El biocarbón tiene efectos significativos sobre las propiedades físicas de los suelos agrícolas. Estos cambios afectan el crecimiento de las plantas al alterar la profundidad de penetración de las raíces y la disponibilidad del agua (Brassard et al. 2019). En la Figura 2 se presentan aquellas propiedades físicas del suelo que son impactadas por el biocarbón.

#### Figura 2

*Propiedades físicas del suelo que son impactadas por el biocarbón*



*Nota.* Adaptado de Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications (p. 111), por Brassard et al. (2019).

Ya que la densidad ( $\rho$ ) de las partículas del biocarbón es menor que las del suelo, los suelos enmendados sufren un aumento en su área superficial y porosidad, también una reducción de su densidad. La comprensibilidad del suelo disminuye con el aumento de la cantidad de biocarbón añadido o también si se reduce el tamaño de partículas del biocarbón. Los suelos enmendados con biocarbón tienden a mostrar una mayor capacidad de retención de agua, producto de un aumento del área superficial y porosidad (Brassard et al. 2019).

#### b. Impacto del biocarbón sobre las propiedades químicas del suelo

Los efectos del biocarbón sobre las propiedades químicas están asociadas a las propiedades fisicoquímicas del biocarbón y las interacciones que

ocurren entre éste y las comunidades microbianas presentes en el suelo (Brassard et al. 2019).

### Figura 3

*Propiedades químicas del suelo que son impactadas por el biocarbón*



*Nota.* Adaptado de Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications (p. 114), por Brassard et al. (2019).

El impacto del biocarbón sobre el pH del suelo, está determinado por el pH del biocarbón producido (Brassard et al. 2019). Biocarbón con pH básico serán apropiados para suelos ácidos y con pH ácido para suelos alcalinos. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es un parámetro importante para determinar la capacidad de retención de nutrientes del suelo (Mukhopadhyay et al. 2018). En general, los suelos enmendados con biocarbón presentan una mejora en su CIC. La enmienda con biocarbón aumenta el contenido de carbono orgánico del suelo; así mismo estimula la descomposición de la materia orgánica del suelo (Brassard et al. 2019). El efecto del biocarbón sobre el contenido de nitrógeno está asociado a las propiedades fisicoquímicas de este. Sus propiedades fisicoquímicas pueden influir en la mineralización, inmovilización, nitrificación y fijación biológica del N<sub>2</sub>. En esta última, al promover el desarrollo de microorganismos fijadores de nitrógeno en el suelo (Brassard et al. 2019).

El contenido de fósforo (P) del biocarbón puede ingresar al suelo de manera directa, los contenidos de P en el biocarbón dependen de la materia

prima usada y la temperatura de pirólisis. Además, la liberación de fósforo se ve afectada por la concentración inicial de P en el suelo (Brassard et al. 2019).

### **c. Impacto del biocarbón sobre las propiedades biológicas del suelo**

Los suelos enmendados con biocarbón pueden sufrir cambios significativos en sus propiedades biológicas como una modificación de la diversidad microbológica y de sus actividades enzimáticas. Las partículas del biocarbón pueden actuar como zonas de asentamiento para los microorganismos, promoviendo la biota del suelo (Brassard et al. 2019).

### **2.2.2.8 Materia prima para la producción de biocarbón**

La biomasa es un material que deriva de la materia orgánica viva o en descomposición y que sirve de materia prima para la producción de biocarbón (Lee, Sarmah, Kwon 2018). Existen diversas clasificaciones para la biomasa, las se mencionan a continuación incorporan a los lodos residuales dentro de su clasificación.

#### **a. De acuerdo a su composición**

La biomasa puede clasificarse por su composición como biomasa lignocelulósica (BML), la cual incluye madera, plantas, residuos forestales y residuos de cultivos agrícolas o biomasa no lignocelulósica (BMNL) como estiércol animal, partes orgánicas de residuos sólidos urbanos, lodos residuales, entre otros (Lee, Sarmah, Kwon 2018). La biomasa lignocelulósica se compone de un polímero aromático (lignina) y polímeros de carbohidratos (celulosa, hemicelulosa). Por otro lado, la biomasa no lignocelulósica (BMNL) contiene principalmente proteínas, lípidos, sacáridos, componentes inorgánicos y minerales, así como una fracción de lignina y celulosa (Li, Jiang 2017).

#### **b. De acuerdo al contenido de humedad**

La cantidad inicial humedad presente en la biomasa determina los procesos que se deben aplicar para lograr su conversión a biocarbón. Se considera como biomasa seca a los residuos agrícolas con un contenido de humedad menor al 30%. Por otro lado, la biomasa húmeda (% de humedad

mayor a un 30%) podemos encontrarla en los lodos de depuradoras, algas, restos de animales, entre otros. En el caso de la biomasa húmeda, es necesario realizar un proceso de deshidratación previo a la conversión termoquímica (Lee, Sarmah, Kwon 2018).

### **c. De acuerdo a su origen**

La biomasa puede también ser categorizada de acuerdo a su origen como biomasa cultivada para un fin (ej. cultivos energéticos) y biomasa residual o de desecho. Un ejemplo de la primera son los cultivos energéticos, los cuales se caracterizan por su bajo contenido de humedad y alto contenido de energía. La biomasa residual incluye restos de comida, lodos residuales, residuos agroforestales, excrementos de animales y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales. El empleo de la biomasa de desecho para la producción de biocarbón no solo es amigable con el medio ambiente, sino que también genera el camino para una utilización eficaz de diferentes flujos de residuos (Lee, Sarmah, Kwon 2018).

#### **2.2.2.9 Lodos residuales de la actividad acuícola como materia prima para la producción de biocarbón**

Los lodos residuales de la acuicultura están compuestos por desechos derivados de la alimentación (alimento no consumido y excremento), que comprenden materiales disueltos como nutrientes con altos contenidos de fósforo (P) y nitrógeno (N), o materiales en fase sólida como los sólidos en suspensión (Cripps, Bergheim 2000).

En general, los peces criados en piscigranjas se alimentan de piensos granulados, los cuales contienen nutrientes (P y N) y otros oligoelementos. Aproximadamente, el 70 % del P y el 15 % de N del que se alimentan los peces son eliminados a través de sus heces. La mayor parte del N excretado se disuelve, mientras que el P se mantiene en estado sólido (del Campo et al. 2010). Los lodos residuales de la acuicultura difieren entre sí de acuerdo al tipo de alimento que se suministre a los peces, la especie cultivada y la infraestructura utilizada en el sistema (Tabla 4).

**Tabla 4***Características de diferentes lodos residuales provenientes de la acuicultura*

Fuente del lodo	Composición (g/l)						
	ST	SV	NT	NTK	FT	DQO	DBO
Tanque clarificador para truchas	22	17	0.2				
Filtro de perlas en un sistema de recirculación de bagres	1.0			0.039	0.007	1.0	0.2
Clarificador en un sistema de recirculación de lubina rayada	40 – 60	3.5 – 5.5	2.5 – 3.5			75 – 95	
Cuenca de decantación de un canal de truchas	50 – 120	25 – 90	0.7 – 6		0.8 – 4		
Filtro de perlas en un sistema de recirculación de tilapia	14 – 26	10 – 23	0.5 – 1.2		0.08 – 0.7		1.6 – 3.9
Cuenca de decantación de un canal de truchas, los sólidos se acumulan en menos de 8 días	36 – 84	27 – 62		2.1 – 3.7	0.7 – 2.4	78 - 113	

*Nota.* Tomado de Utilization of sludge from recirculation aquaculture systems (p.28), por L. del Campo, 2010, Nofima.

La información incluye a los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), nitrógeno total (NT), nitrógeno de Kjeldhal (NTK), fósforo total (FT), demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (del Campo et al. 2010).

Para la producción de biocarbón basada en materia prima no lignocelulósica, la cual incluye los lodos residuales de cualquier fuente, se utilizan los métodos de pirólisis y carbonización hidrotermal. La utilización de una u otra depende en gran medida del estado físico de la materia prima y el fin tecnológico del biocarbón producido (Li, Jiang 2017).

#### **2.2.4 Pirólisis**

El creciente interés en la utilización de biocarbón para diversas aplicaciones ha llevado consigo una mayor conversión de biomasa a biocarbón y dentro de las técnicas de conversión utilizadas, el método termoquímico es el más común para la producción de biocarbón. Las técnicas termoquímicas utilizadas para la producción de biocarbón incluyen pirólisis, carbonización hidrotermal, gasificación, carbonización instantánea y torrefacción (Yaashikaa et al. 2020).

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de la biomasa a temperaturas altas (250 – 900 °C), bajo condiciones inertes y controladas; es decir en una atmósfera en ausencia parcial o total de oxígeno y más recientemente en una atmósfera de N<sub>2</sub>. Las condiciones de pirólisis como la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia se pueden considerar entre los parámetros característicos que distinguen los diferentes tipos de pirólisis y a su vez tienen un gran efecto sobre las características físico químicas del biocarbón producido (Lee, Sarmah, Kwon 2018; Shackley et al. 2016; Yaashikaa et al. 2020; Yuan et al. 2015).

Durante el proceso de pirólisis se presentan fases, una fase de liberación de vapor, producto de la descomposición térmica de los compuestos orgánicos de la biomasa, y una sólida representada por el biocarbón. En la fase de vapor, los compuestos polares y de alto peso molecular se enfrían para producir una fase líquida (bioaceite) mientras que los compuestos de bajo peso molecular (gases no condensables como H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>) que permanecen representan la fase gaseosa (Lee, Sarmah, Kwon 2018).

La transformación de la biomasa no lignocelulósica la cual incluye a los lodos, comienza con la división del agua libre y ligada contenida en el lodo; la

cual ocurre por debajo de los 200 °C. Por encima y cercano a los 200 °C, ocurre la descomposición de los compuestos orgánicos (proteínas, lípidos, carbohidratos); la cual comienza con la ruptura de las uniones de menor energía como los enlaces hidrógeno y la unión C – OH. La ruptura de enlaces más fuertes va ocurriendo con el aumento de la temperatura. Es principalmente entre los 300 – 600 °C aproximadamente que ocurre la descomposición de la gran mayoría de los compuestos orgánicos presentes en el lodo (Li, Jiang 2017).

#### **2.2.4.1 Condiciones de pirólisis que afectan las propiedades del biocarbón**

##### **a. Temperatura**

La temperatura de pirólisis influye en las propiedades fisicoquímicas y la estructura del biocarbón; por ejemplo, la composición elemental, estructura de los poros, área de superficie y grupos funcionales. El impacto de la temperatura de pirólisis en tales propiedades puede atribuirse a la liberación de compuestos volátiles que ocurre a altas temperaturas (Yaashikaa et al. 2020).

##### **b. Tiempo de residencia**

De acuerdo a Yaashikaa et al. (2020), un tiempo de residencia prolongado a temperaturas de pirólisis bajas (300 °C) provoca una disminución en el rendimiento de producción de biocarbón y un aumento del pH. Por otro lado, el aumento del tiempo de residencia a altas temperaturas (600 °C) tiene poco impacto en el rendimiento de producción y pH.

#### **2.2.4.2 Tipos de pirólisis**

La pirólisis puede clasificarse como pirólisis rápida o lenta, según sus parámetros operativos, especialmente la velocidad de calentamiento (Lee, Sarmah, Kwon 2018).

##### **a. Pirólisis lenta**

Este proceso se lleva a cabo a temperaturas de 300 – 800 °C con una velocidad de calentamiento que oscila entre los 5 – 10 °C/min y un tiempo de residencia mayor a 1 h. Como resultado se obtiene un mayor rendimiento de

producción de biocarbón (35 – 50 % en peso) en comparación a otras estrategias de pirólisis. Debido a ello, la pirólisis lenta es una tecnología muy adecuada para la producción de biocarbón. El biocarbón producido por esta técnica, tiene potencial para la mejora de la calidad del suelo (Lee, Sarmah, Kwon 2018); (Shackley et al. 2016); (Yaashikaa et al. 2020).

### **b. Pirólisis rápida**

Las condiciones de operación que caracterizan a la pirólisis rápida, tienen por objetivo obtener el máximo rendimiento de producción de bioaceite (70 – 75 % en peso); el cual tiene un alto potencial para aplicaciones energéticas (Chen et al. 2020; Shackley et al. 2016; Yaashikaa et al. 2020). La producción de biocarbón en este proceso es del 15 – 30 % en peso (Lee et al., 2018). Las condiciones típicas en la pirólisis rápida incluyen temperaturas moderadas que oscilan entre los 400 – 600 °C (Lee, Sarmah, Kwon 2018; Li, Jiang 2017; Shackley et al. 2016; Yaashikaa et al. 2020), velocidades de calentamiento por encima de los 100 °C/min (Shackley et al. 2016; Yaashikaa et al. 2020) y tiempos de residencia cortos de 0.5 – 2 s (Shackley et al. 2016).

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1 Pirólisis de lodos residuales de acuicultura**

Se refiere al proceso de descomposición térmica a temperaturas altas (250 - 900 °C), bajo condiciones inertes y controladas de todos aquellos materiales utilizados durante los procesos de la acuicultura y que no se eliminan del sistema durante la recolección o cosecha (Lee, Sarmah, Kwon 2018; Chen, Coffin, Malone 1997).

### **2.3.2 Calidad del biocarbón como enmienda de suelo**

Son aquellas propiedades fisicoquímicas del biocarbón que afectan su uso como mejorador de las funciones del suelo; es decir agregando nutrientes orgánicos e inorgánicos, mejorando la labranza del suelo, la materia orgánica y la capacidad de retención de agua (International Biochar Initiative 2015; Clements, Bihn 2019).

## **2.4 Definición de términos básicos**

### **Acuicultura**

La acuicultura se define como el cultivo de organismos acuáticos, que implica la intervención en el proceso de cría para aumentar la producción, como fuente de alimentación, empleo e ingresos, optimizando los beneficios económicos en armonía con la preservación del ambiente y la conservación de la biodiversidad, el uso óptimo de los recursos naturales y del territorio; garantizando la propiedad individual o colectiva del recurso cultivado (Poder Ejecutivo 2015).

### **Biocarbón**

Se considera biocarbón a todo material sólido obtenido a partir de la conversión termoquímica de la biomasa (International Biochar Initiative 2015).

### **Biomasa**

Se refiere a la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de origen biológico de la agricultura (incluidas las sustancias vegetales y animales), la silvicultura y las industrias afines, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de origen industrial y municipal (International Biochar Initiative 2015).

### **Calidad del biocarbón**

La calidad del biocarbón está determinada por sus características fisicoquímicas, las mismas que condicionan la capacidad del biocarbón como enmienda de suelo, adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, secuestro de carbono y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Brassard et al. 2019).

### **Enmienda de suelo**

La enmienda de suelo es un material que se utiliza en la agricultura para apoyar el crecimiento y desarrollo de las plantas, específicamente agregando nutrientes orgánicos e inorgánicos y mejorando la labranza del suelo, la materia orgánica y la capacidad de retención de agua (Clements, Bihn 2019).

### **Fitotoxicidad**

La fitotoxicidad se define como el retraso de la germinación de las semillas, la inhibición del crecimiento de las plantas o cualquier efecto adverso sobre las plantas; causado por sustancias específicas (fitotoxinas) o condiciones de crecimiento (Blok et al. 2019). Dependiendo de la procedencia de los lodos residuales que se utilicen para la producción de biocarbón, estos pueden contener elementos fitotóxicos como metales pesados y/o compuestos orgánicos tóxicos; los cuales pueden ser heredados a los biocarbón (Abrego et al. 2015).

### **Lodo residual de la acuicultura**

Son aquellos lodos generados durante la limpieza de los estanques de trucha. Estos se componen principalmente por detritos, alimento no consumido de pescado y heces de pescado.

## **III. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **3.1 Hipótesis**

#### **3.1.1 Hipótesis general**

La pirólisis de lodos residuales de acuicultura influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.

#### **3.1.2 Hipótesis específicas**

- La temperatura de pirólisis influye en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.
- La temperatura de pirólisis influye en la fitotoxicidad del biocarbón.

### 3.2 Operacionalización de variable

**Tabla 5**

*Operacionalización de variable*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Índice/Ítem	Método	Técnica
<b>Independiente:</b> Pirólisis de lodos residuales de acuicultura	Se refiere al proceso de descomposición térmica a temperaturas altas (250 - 900 °C), bajo condiciones inertes y controladas de todos aquellos materiales utilizados durante los procesos de la acuicultura y que no se eliminan del sistema durante la recolección o cosecha (Lee, Sarmah, Kwon 2018; Chen, Coffin, Malone 1997).	Se aplicarán distintas temperaturas de pirólisis con el fin de medir su influencia en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.	Condición del proceso	Temperatura	500 °C 700 °C	Degradación térmica	Observación

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Índice/Ítem	Método	Técnica
<b>Dependiente:</b> Calidad del biocarbón como enmienda de suelo	Son aquellas propiedades fisicoquímicas del biocarbón que afectan su uso como mejorador de las funciones del suelo; es decir agregando nutrientes orgánicos e inorgánicos, mejorando la labranza del suelo, la materia orgánica y la capacidad de retención de agua (International Biochar Initiative 2015; Clements, Bihn 2019).	La calidad del biocarbón se determina de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas: pH, CE, carbono orgánico, H:C <sub>org</sub> , fósforo, potasio, humedad, ceniza, materia volátil; y su fitotoxicidad a través del índice de germinación.	Propiedades fisicoquímicas	pH	-	Rajkovich et al. (2011)	Observación
				Conductividad eléctrica	μS/cm	Rajkovich et al. (2011)	Observación
				Carbono orgánico (C <sub>org</sub> )	%	C: ASTM D5373 C <sub>inorg</sub> : ASTM D4373	Observación
				H:C <sub>org</sub>	Relación molar	H: ASTM D5373	Observación
				Nitrógeno total	%	ASTM D5373	Documentario
				Fósforo total	%	Absorción atómica	Documentario
				Potasio total	%	Absorción atómica	Documentario
				Humedad	%	ASTM D1762-84	Documentario
				Ceniza	%	ASTM D1762-84	Documentario
				Materia volátil	%	ASTM D1762-84	Documentario
			Fitotoxicidad	Índice de germinación	%	Zucconi et al. (1981)	Observación

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1 Diseño metodológico

El diseño metodológico se describe en la Figura 4, el cual incluye los procedimientos desarrollados para el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación.

#### Figura 4

*Diagrama de los procedimientos experimentales*



A continuación, se describen los procedimientos experimentales desarrollados en la presente investigación:

#### 4.1.1 Recolección de muestras de lodos residuales de acuicultura

Se recolectó 02 litros aproximadamente de una muestra compuesta de lodos residuales de acuicultura de truchas (*Salmo trutta*), representativa del lodo total, obtenida a partir de la toma de muestras puntuales en los 10 estanques de una piscigranja ubicada en Paríamarca, Canta – Lima, tomando como referencia

lo establecido en el “Protocolo de monitoreo de biosólidos” propuesta por VIVIENDA (2018).

### **Figura 5**

*Muestreo de lodos residuales de acuicultura*



#### **4.1.2 Elaboración del biocarbón a partir de lodos residuales de acuicultura**

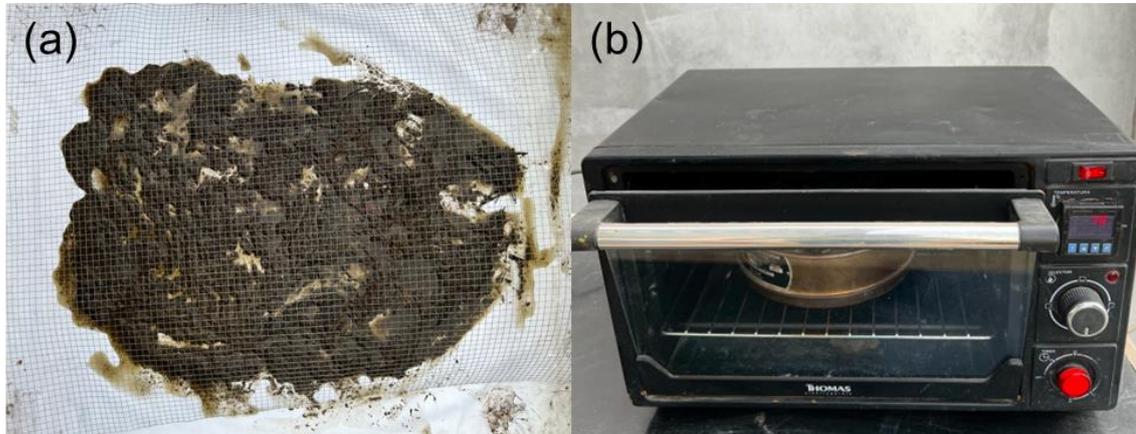
##### **4.1.2.1 Secado de los lodos residuales de acuicultura**

Los lodos residuales de acuicultura recolectados fueron esparcidos en un plástico de 4 m<sup>2</sup> y se retiró manualmente cualquier tipo de impurezas (rocas, hojarasca, residuos plásticos u otros), para luego ser sometidos a un proceso de secado a la intemperie durante 05 días.

Posteriormente, se realizó el proceso de secado de los lodos residuales de acuicultura en un horno eléctrico diseñado para remover el contenido de humedad por convección, haciendo circular el aire caliente alrededor de la muestra. El secado se llevó a cabo a una temperatura de 70 °C por 24 horas.

## Figura 6

### *Secado de lodos residuales de acuicultura*



*Nota.* (a) Secado a la intemperie, (b) Secado en horno eléctrico

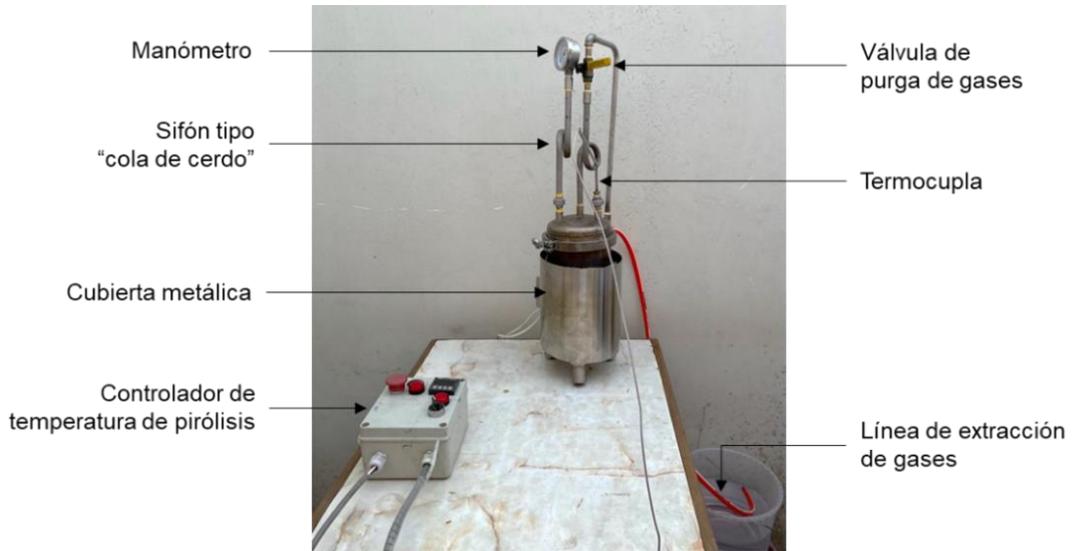
#### **4.1.2.2 Pirólisis de los lodos residuales de acuicultura**

El proceso de pirólisis se llevó a cabo en un reactor pirolítico de 5 litros. Las partes del reactor pirolítico se detallan en la Figura 7.

Se ingresaron 06 lotes de muestras de lodos residuales de acuicultura previamente secados (300 g de peso cada lote) al reactor pirolítico para llevar a cabo el proceso de pirólisis a dos temperaturas, 500 °C y 700 °C (Tabla 6) en ausencia de oxígeno, durante un tiempo de residencia de 1 hora y a una velocidad de calentamiento de 12 °C/min. Al finalizar el proceso de pirólisis de cada lote, se dejó enfriar el reactor a temperatura de ambiente por 1 hora y se retiró el biocarbón obtenido, para su posterior pesado y estimación del rendimiento de producción del biocarbón.

**Figura 7**

*Partes del reactor pirolítico empleado para la elaboración de biocarbón*



**Tabla 6**

*Distribución de las unidades experimentales para la producción de biocarbón*

Tratamiento	Temperatura de pirólisis (°C)	Tiempo de residencia (h)
B500-1	500	1
B500-2	500	1
B500-3	500	1
B700-1	700	1
B700-2	700	1
B700-3	700	1

#### **4.1.2.3 Molienda y tamizado**

Cada lote de biocarbón obtenido se molieron con ayuda de un mortero y pilón de porcelana. Luego, se tamizaron con un tamiz N° 40 (425  $\mu\text{m}$ ) y posteriormente, se empacaron en bolsas de plástico selladas herméticamente.

## Figura 8

*Biochar elaborado a partir de lodos residuales de acuicultura*



Nota. (a) Biochar obtenido a 500 °C, (b) Biochar obtenido a 700 °C.

### 4.1.3 Evaluación de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón

Se enviaron 06 muestras del biocarbón obtenido de los tratamientos de pirólisis, cada muestra de 100 g, al laboratorio SLAB S.A.C. para determinar las propiedades fisicoquímicas: Azufre (ASTM D4239), hidrógeno (ASTM D3178), nitrógeno (ASTM D5373), carbono (ASTM D5373), carbono inorgánico (ASTM D4373), fósforo total (absorción atómica), potasio total (absorción atómica), humedad (ASTM D1762), ceniza (ASTM D1762) y materia volátil (ASTM D1762).

El contenido de carbono orgánico ( $C_{org}$ ) se calculó por diferencia del carbono total y el carbono inorgánico. La relación H: $C_{org}$  se calculó al dividir el hidrógeno y el carbono orgánico ( $C_{org}$ ).

Por otro lado, se realizó el procedimiento de análisis de pH y conductividad eléctrica en el laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, según Rajkovich et al. (2011). Se preparó una solución con cada biocarbón obtenido a una proporción de 1.0 g de biocarbón en 20 ml de agua desionizada, luego se colocaron en el agitador magnético por 1.5 h para asegurar un equilibrio suficiente entre la solución y las superficies del biocarbón. Posteriormente, se determinó el pH y la conductividad eléctrica con un medidor de pH Orion STAR A326 (Thermo Fisher Scientific) y un medidor multiparámetro Oakton 600 series, respectivamente (Figura 9).

## Figura 9

### Análisis de pH y conductividad eléctrica



Nota. (a) Medición de pH, (b) Medición de C.E.

#### 4.1.4 Evaluación de la fitotoxicidad del biocarbón

Se desarrolló la prueba de fitotoxicidad de acuerdo a Liang et al. (2016); Zucconi et al. (1981). En la Tabla 7 se muestra la distribución de las unidades experimentales realizadas para la determinación de fitotoxicidad a través del índice de germinación. Se preparó una solución con lodo seco y con cada biocarbón obtenido a una proporción de 1.0 g de muestra en 10 ml de agua desionizada, luego se colocaron en el agitador magnético por 10 min. A continuación, se filtraron los lixiviados utilizando papel filtro Whatman N° 41.

Se colocaron 10 semillas de tomate (*Solanum Lycopersicum*) de la variedad río grande con 5 ml del lixiviado preparado sobre placas Petri de 90 mm, incluyendo como control a las placas con 10 semillas con 5ml de agua desionizada. Todas las placas Petri fueron cubiertas con tapas y envueltas con papel Kraft para posteriormente ser incubadas bajo oscuridad a 25 °C por 72 h. Finalmente, pasadas las 72 h, se calculó el porcentaje de germinación y longitud de las raíces de las semillas germinadas con la ayuda de una regla. La longitud de la raíz se promedió para cada placa Petri.

El índice de germinación (IG) se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$IG = \left(\frac{G}{G_0}\right) \times \left(\frac{L}{L_0}\right) \times 100$$

Donde G y G<sub>0</sub> son los porcentajes de germinación del lixiviado y el control (agua desionizada) respectivamente, L y L<sub>0</sub> presentan media de las longitudes de las raíces del lixiviado y el control, respectivamente.

**Tabla 7**

*Distribución de las unidades experimentales para la determinación de la fitotoxicidad*

Tratamiento	Relación Biocarbón / Agua desionizada	Volumen de lixiviado (ml)	Nº semillas de tomate	Repeticiones (*)
T1 [LLS + S]	1:10	5 ml	10	3
T2 [LB500 + S]	1:10	5 ml	10	3
T3 [LB700 + S]	1:10	5 ml	10	3
Total	9	unidades experimentales		

*Nota.* **S:** Semilla de tomate, **LB500:** Lixiviado de biocarbón obtenido a 500 °C, **LB700:** Lixiviado de biocarbón obtenido a 700 °C, **LLS:** Lixiviado de lodo seco, (\*) Según metodología aplicada por Videgain-Marco et al. (2020).

**Figura 10**

*Ensayo de fitotoxicidad del biocarbón*



*Nota.* Ensayo de germinación de *Solanum Lycopersicum*

## 4.2 Método de investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, dado que se utiliza métodos y técnicas cuantitativas, por tanto, tiene que ver con la medición, el uso de magnitudes, la observación y medición de las unidades de análisis, el muestreo, el tratamiento estadístico y la prueba de hipótesis (Ñaupas 2020).

El tipo de investigación es básica, pues su objeto es aportar nuevos conocimientos en cuanto a la influencia de la pirólisis en la calidad del biocarbón elaborado a partir de lodos residuales de acuicultura, por ende, servirá de base para futuras investigaciones aplicadas (Ñaupas 2020).

El nivel de investigación es explicativo; de acuerdo a Ñaupas (2020) este tipo de investigación tiene como objetivo principal la verificación de hipótesis causales o explicativas; es decir que explican las causas de los hechos, fenómenos, eventos y procesos naturales o sociales. La presente investigación determina el efecto de la variable independiente "Pirólisis de lodos residuales de acuicultura" en la variable dependiente "Calidad del biocarbón como enmienda de suelo" (Ñaupas 2020).

El diseño de investigación es experimental, puesto que en el estudio se realiza la manipulación intencionada de la variable independiente "Pirólisis de lodos residuales de acuicultura", a través del factor "temperatura", y así examinar atentamente el efecto sobre la variable dependiente "Calidad del biocarbón como enmienda de suelo" (Ñaupas 2020).

En la presente investigación se aplica el método hipotético - deductivo, el cual consiste en ir de la hipótesis a la deducción para determinar la verdad o falsedad de los hechos mediante el principio de la falsación. El método comprende los siguientes pasos: planteamiento del problema, formulación de la hipótesis, deducción de consecuencias contrastables (observables y medibles) de la hipótesis; y observación, verificación o experimentación (Ñaupas 2020).

### 4.3 Población y muestra

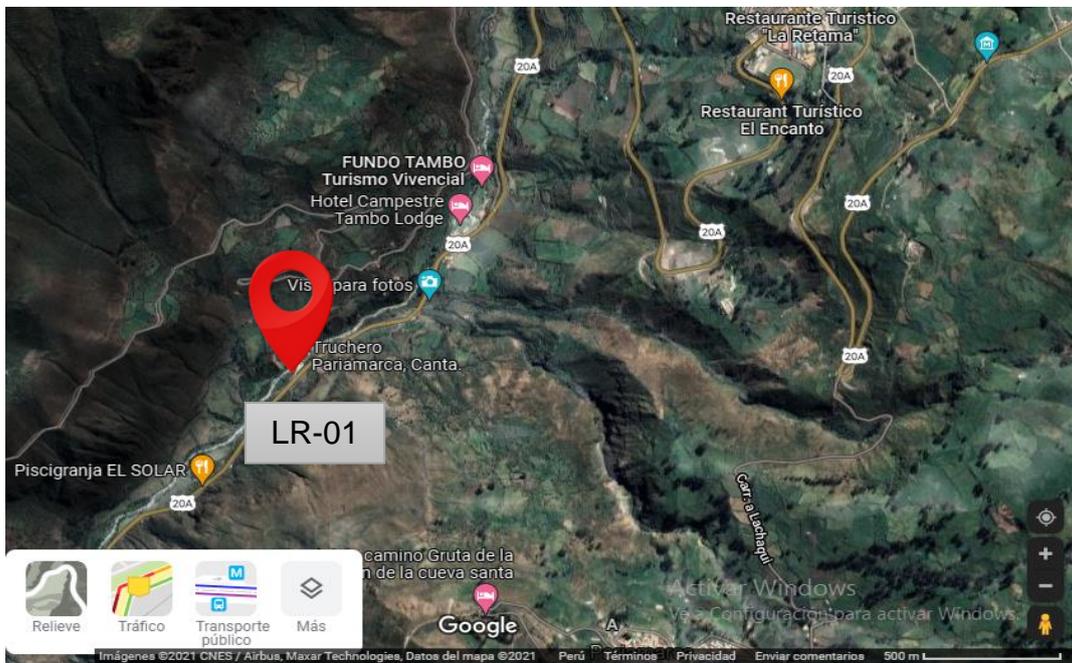
#### 4.3.1 Población

La población viene a ser el conjunto de objetos, hechos, sucesos que se van a estudiar con diversas técnicas (Ñaupas 2020).

Para el presente estudio, la población fueron los lodos residuales de acuicultura de truchas (*Salmo trutta*) generados de los 10 estanques de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima.

#### Figura 11

Ubicación en mapa de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima



#### Tabla 8

Coordenadas de ubicación de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima

Código	Coordenadas UTM (WGS84)		Altitud (m.s.n.m)	Zona
	X	Y	Z	
LR – 01	678994.2733369571	1269785.6028236987	2 422	43

## **Figura 12**

*Vista frontal de los estanques de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima*



### **4.3.2 Muestra**

La muestra fue un volumen de 2 litros aproximadamente de lodos residuales de acuicultura, tomando muestras puntuales durante la descarga de los 10 estanques de la piscigranja. De las muestras puntuales se preparó una muestra compuesta, representativa del lodo total.

### **4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado**

Los estudios se llevaron a cabo en el laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, en un periodo de tres meses, mayo – julio del año 2023.

### **4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información**

Las técnicas empleadas en la presente investigación fueron la observación experimental y documentaria.

#### **4.5.1 Materiales y equipos**

##### **4.5.1.1 Trabajo en campo**

El trabajo en campo consistió en la recolección de muestras de lodos residuales acumulados en los 10 estanques de la piscigranja. Para ello se utilizó un balde de polietileno de 25 litros, pala manual, un carcal de pesca o chinguillo

de mano, malla de plástico, botas de pescador de goma, guantes de látex, plástico de 4 m<sup>2</sup>, bolsas herméticas de 268 x 279 mm, mascarillas quirúrgicas, cámara fotográfica, libreta de campo y marcadores.

#### **4.5.1.2 Trabajo de laboratorio**

Para el trabajo en laboratorio se utilizaron los materiales y equipos que se indican a continuación.

##### **a. Materiales**

Vasos precipitados, mortero y pilón, probetas graduadas, pipetas volumétricas y graduadas, placas Petri, papel de filtro Whatman N° 40, espátula, tamiz N°40.

##### **b. Reactivos**

Agua desionizada.

##### **c. Equipos**

Los equipos a utilizar se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9***Equipos e instrumentos de laboratorio*

Equipo	Modelo	Aplicación
Horno eléctrico	-	Secado de lodos residuales
Reactor pirolítico	-	Carbonización del lodo residual (pirólisis)
Balanza Analítica	Adam Nimbus	Pesado de materiales
Equipo medidor de pH	Orion Star A326	Determinación del pH
Equipo multiparámetro	Oakton 600 series	Determinación de la conductividad eléctrica
Agitador magnético	Cimarec i Series Multipoint - Poly 15	Agitación de soluciones
Incubadora Refrigerada	FOC 225E	Ensayo de fitotoxicidad

#### 4.5.2 Técnicas analíticas

Para la determinación de la calidad del biocarbón producido, se aplicaron las técnicas analíticas propuestas por la International Biochar Initiative (IBI), la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), entre otras; las cuales se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10***Técnicas analíticas de laboratorio*

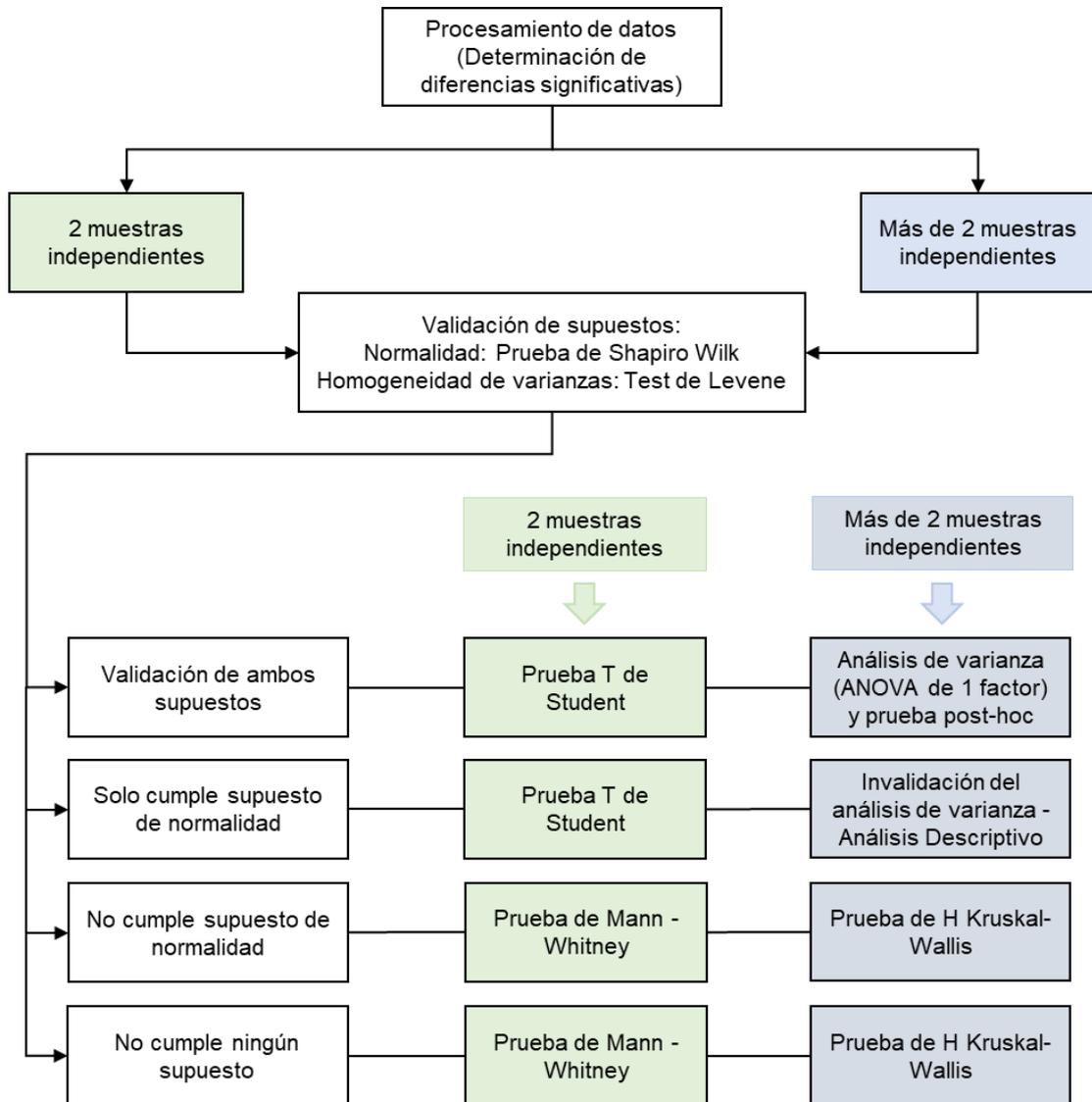
Parámetro	Unidad	Técnica
C, N	%	ASTM D5373/Mét. A
H	%	ASTM D 3178
S	%	ASTM D4239
Carbono inorgánico	%	ASTM D4373
Humedad, ceniza, materia volátil	%	ASTM D1762-84
P total, K total	%	Absorción atómica

#### 4.6 Análisis y procesamiento de datos

El análisis de datos se realizó mediante el software estadístico SPSS versión 27. Se realizó un análisis descriptivo de los parámetros fisicoquímicos y fitotoxicidad del biocarbón, considerando la media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y coeficiente de variación. El análisis inferencial, se realizó a través de pruebas estadísticas adecuadas a los resultados que se deseaban obtener. Estos procesamientos estadísticos fueron aplicados de acuerdo a lo establecido en la Figura 13. El nivel de significancia fue del 5%.

**Figura 13**

*Procesamiento estadístico de resultados obtenidos*



#### 4.7 Aspectos éticos en investigación

Los autores de la presente investigación titulada “Calidad del biocarbón de lodos residuales de la piscigranja Pariamarca, Canta - Lima” aseguran la autenticidad y confiabilidad del estudio y se cumple fielmente el código de ética de investigación aprobado por RDU N° 260-2019-CU y la directiva N° 004-2022-R, establecidas por la Universidad Nacional del Callao.

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

#### 5.2.1 Rendimiento de producción del biocarbón de lodos residuales de acuicultura

El rendimiento de producción del biocarbón se calculó a través de la relación porcentual de la masa seca del producto del proceso de pirólisis y la masa seca del lodo residual de acuicultura. En la Tabla 11, se detallan los resultados obtenidos del rendimiento de producción de biocarbón derivados de los lodos residuales de acuicultura a diferentes temperaturas de pirólisis.

**Tabla 11**

*Rendimiento de producción del biocarbón*

Tratamiento	Lodo residual de acuicultura seco (g)	Biocarbón (g)	Rendimiento (%)
B500-1	300	230	76.67
B500-2	300	229	76.33
B500-3	300	229	76.33
B700-1	300	217	72.33
B700-2	300	217	72.33
B700-3	300	213	71.00

En la Tabla 12 se presentan los resultados descriptivos del rendimiento de producción del biocarbón, donde se observa que el tratamiento a 500 °C obtuvo el mayor rendimiento de producción con un valor de 76.44 %, mientras que a 700 °C un valor de 71.89%.

**Tabla 12**

*Medidas descriptivas del rendimiento de producción del biocarbón*

Tratamiento	N	Media	Desv. estándar	Mínimo	Máximo
B500	3	76.44	0.20	76.33	76.67
B700	3	71.89	0.77	71.00	72.33

## 5.2.2 Propiedades fisicoquímicas del biocarbón de lodos residuales de acuicultura

Los resultados reportados en el informe de ensayo realizado por SLAB S.A.C. se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Caracterización del biocarbón de lodos residuales de acuicultura*

Tratamiento	pH	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	C inorgánico (%)	C total (%)	H total (%)	S total (%)	N total (%)	P total (%)	K total (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)	Materia Volátil (%)
B500-1	8.26	208.30	58.30	69.02	1.50	0.36	0.76	0.84	0.27	0.79	4.73	22.43
B500-2	8.41	206.60	57.60	68.50	1.42	0.32	0.72	0.80	0.24	0.78	4.05	24.43
B500-3	8.35	206.10	55.00	68.03	1.49	0.31	0.68	0.88	0.24	0.77	5.86	25.61
B700-1	8.72	266.50	49.00	63.48	1.00	0.28	0.28	0.85	0.33	0.92	7.32	20.75
B700-2	8.68	288.70	50.00	63.88	1.10	0.32	0.32	0.87	0.33	0.97	7.98	21.00
B700-3	8.58	278.30	51.00	64.07	1.15	0.30	0.34	0.68	0.36	0.98	7.70	18.83

A partir de los resultados de la Tabla 13 se realizaron los cálculos para obtener el carbono orgánico ( $C_{\text{org}}$ ),  $H:C_{\text{org}}$ , y  $H:C$  que se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Propiedades fisicoquímicas del biocarbón calculadas a partir del análisis elemental*

Tratamiento	C orgánico <sup>1</sup> (%)	H:C <sub>org</sub> <sup>2</sup>	H:C <sup>3</sup>
B500-1	10.72	0.14	0.022
B500-2	10.90	0.13	0.021
B500-3	13.03	0.11	0.022
B700-1	14.48	0.07	0.016
B700-2	13.88	0.08	0.017
B700-3	13.07	0.09	0.018

*Nota.* <sup>1</sup> El C orgánico se calculó a partir de la diferencia del C total y el C inorgánico. <sup>2</sup> El H:C<sub>org</sub> se calculó de la división del H total y el C orgánico. <sup>3</sup> El H:C se calculó de la división del H total y el C total.

Las medidas descriptivas de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón se presentan en la Tabla 15. Se observa que para las propiedades fisicoquímicas relación H:C<sub>org</sub>, nitrógeno total, fósforo total y materia volátil disminuyen con la temperatura de pirólisis; mientras que, pH, conductividad eléctrica, C<sub>org</sub>, potasio total, humedad y ceniza, aumentan con la temperatura de pirólisis.

**Tabla 15***Medidas descriptivas de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón*

Propiedad fisicoquímica	Tratamiento	N	Media	Desviación estándar	Mediana	Mínimo	Máximo	Coficiente de variación
pH	500	3	8.43	0.08	8.35	8.26	8.41	0.01
	700	3	8.66	0.07	8.68	8.58	8.72	0.01
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	500	3	207.00	1.15	206.60	206.10	208.30	0.01
	700	3	277.83	11.11	278.30	266.50	288.70	0.04
C <sub>org</sub> (%)	500	3	11.55	1.28	10.90	10.72	13.03	0.01
	700	3	13.81	0.71	13.88	13.07	14.48	0.05
H:C <sub>org</sub>	500	3	0.13	0.02	0.13	0.11	0.14	0.12
	700	3	0.08	0.01	0.08	0.07	0.09	0.13
H:C	500	3	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03
	700	3	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.06
N total (%)	500	3	0.72	0.04	0.72	0.68	0.76	0.06
	700	3	0.31	0.03	0.32	0.28	0.34	0.10
P total (%)	500	3	0.84	0.04	0.84	0.80	0.88	0.05
	700	3	0.80	0.10	0.85	0.68	0.87	0.13
K total (%)	500	3	0.25	0.02	0.24	0.24	0.27	0.07
	700	3	0.34	0.02	0.33	0.33	0.36	0.05
Humedad (%)	500	3	0.78	0.01	0.78	0.77	0.79	0.01
	700	3	0.96	0.03	0.97	0.92	0.98	0.03
Ceniza (%)	500	3	4.88	0.91	4.73	4.05	5.86	0.19
	700	3	7.67	0.33	7.70	7.32	7.98	0.04
Materia volátil (%)	500	3	24.16	1.61	24.43	22.43	25.61	0.07
	700	3	20.19	1.19	20.75	18.83	21.00	0.06

### 5.2.3 Fitotoxicidad del biocarbón de lodos residuales de acuicultura

Las pruebas de fitotoxicidad del biocarbón se realizaron con tres muestras: lodo seco, biocarbón a 500°C y biocarbón a 700°C, con tres repeticiones cada una.

Los resultados obtenidos de los índices de germinación del tomate (*Solanum Lycopersicum*) se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16***Índices de germinación de Zucconi del ensayo de fitotoxicidad*

Tratamiento	Índice de germinación (%)
LS	83.51
LS	99.42
LS	54.68
B500-1	138.19
B500-2	135.21
B500-3	124.28
B700-1	53.69
B700-2	85.50
B700-3	104.39

*Nota.* LS: Lodo seco, B500: Biocarbón obtenido a 500°C, B700: Biocarbón obtenido a 700°C

Las medidas estadísticas de la prueba de fitotoxicidad se presentan en la Tabla 17. Se observa que el índice de germinación es mayor con el biocarbón producido a 500 °C.

**Tabla 17***Medidas descriptivas de la prueba de fitotoxicidad*

Tratamiento	N	Media	Desviación estándar	Mediana	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variación
LS	3	79.20	22.68	83.51	54.68	99.42	0.29
B500	3	132.56	7.32	135.21	124.28	138.19	0.06
B700	3	81.19	25.62	85.50	53.69	104.39	0.32

*Nota.* LS: Lodo seco, B500: Biocarbón obtenido a 500°C, B700: Biocarbón obtenido a 700°C

## 5.2 Resultados inferenciales

### 5.2.1 Propiedades fisicoquímicas del biocarbón de lodos residuales de acuicultura

Con el propósito de determinar la prueba estadística adecuada, se evaluó la distribución de los datos de las propiedades fisicoquímicas utilizando la prueba de Shapiro-Wilk. Además, se aplicó la prueba de Levene para comprobar la homogeneidad de las varianzas.

**Tabla 18**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk de las propiedades fisicoquímicas*

Propiedad fisicoquímica	Tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	p-valor
pH	500	0.99	3	0.78
	700	0.94	3	0.54
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	500	0.91	3	0.42
	700	1.00	3	0.93
C <sub>org</sub> (%)	500	0.81	3	0.13
	700	0.99	3	0.84
H:C <sub>org</sub>	500	0.96	3	0.64
	700	1.00	3	1.00
N total (%)	500	1.00	3	1.00
	700	0.96	3	0.64
P total (%)	500	1.00	3	1.00
	700	0.83	3	0.18
K total (%)	500	0.75	3	0.00
	700	0.75	3	0.00
Humedad (%)	500	1.00	3	1.00
	700	0.87	3	0.30
Ceniza (%)	500	0.98	3	0.73
	700	0.99	3	0.83
Materia volátil (%)	500	0.98	3	0.72
	700	0.84	3	0.20

De la Tabla 18, se deduce que los datos que conforman cada grupo de los parámetros de pH, C.E., C<sub>org</sub>, H:C<sub>org</sub>, nitrógeno total, fósforo total, humedad,

ceniza y materia volátil, tienen una distribución normal, ya que los p-valor son mayores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ); por consiguiente, para determinar diferencias entre 02 grupos de tratamiento (temperatura de pirólisis) de un factor o el efecto de este factor sobre los parámetros fisicoquímicos, se utilizó la prueba paramétrica T de Student (Prueba de t para muestras independientes). Por otro lado, se observó que el potasio total no tiene una distribución normal, siendo su p-valor menor al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ); por lo tanto, se utilizó la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney.

**Tabla 19**

*Prueba de Levene de igualdad de varianzas de los parámetros fisicoquímicos*

Propiedad fisicoquímica	F	p-valor
pH	0.00	1.00
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3.54	0.13
C <sub>org</sub> (%)	2.24	0.21
H:C <sub>org</sub>	0.73	0.44
N total (%)	0.08	0.79
P total (%)	4.66	0.10
K total (%)	0.00	1.00
Humedad (%)	5.57	0.08
Ceniza (%)	2.37	0.20
Materia volátil (%)	0.23	0.66

De la Tabla 19, se deduce que todos los parámetros cumplen con la homogeneidad de varianzas en cada grupo, ya que su p-valor es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

**Tabla 20***Resultados de la prueba T de Student*

Propiedad fisicoquímica	t	gl	p-valor	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
pH	-5.31	4	0.01	-0.49	-0.15
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	-10.99	4	0.00	-88.73	-52.93
C <sub>org</sub> (%)	-2.67	4	0.06	-4.61	0.09
H:C <sub>org</sub>	4.43	4	0.01	0.02	0.08
N total (%)	13.99	4	0.00	0.33	0.49
P total (%)	0.62	4	0.57	-0.14	0.22
Humedad (%)	-9.09	4	0.00	-0.23	-0.12
Ceniza (%)	-4.96	4	0.01	-4.35	-1.23
Materia volátil (%)	3.44	4	0.03	0.76	7.17

De acuerdo a la Tabla 20, se deduce que existen diferencias en los parámetros pH, C.E., H:C<sub>org</sub>, N total, humedad, ceniza y materia volátil entre los grupos comparados, debido a que los p-valor son menores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ); mientras que para el C<sub>org</sub> y P total no existen diferencias entre los grupos comparados, dado que sus p-valor son mayores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

**Tabla 21***Resultado de la prueba U de Mann-Whitney*

Propiedad fisicoquímica	U de Mann-Whitney	p-valor
K total	0.00	0.04

De acuerdo a la Tabla 21, se deduce que existe diferencias de K total entre los grupos comparados, debido a que el p-valor es menor al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

### 5.2.2 Prueba de fitotoxicidad del biocarbón de lodos residuales de acuicultura

Con el propósito de determinar la prueba estadística adecuada, se evaluó la distribución de los datos de la fitotoxicidad utilizando la prueba de Shapiro-Wilk. Además, se aplicó la prueba de Levene para comprobar la homogeneidad de las varianzas.

**Tabla 22**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk de la fitotoxicidad*

Tratamiento	Estadístico	gl	p-valor
LS	0.97	3	0.68
B500	0.90	3	0.39
B700	0.98	3	0.72

*Nota.* LS: Lodo seco, B500: Biocarbón obtenido a 500°C, B700: Biocarbón obtenido a 700°C

De la Tabla 22, se deduce que los datos que conforman cada grupo de la fitotoxicidad tienen una distribución normal, ya que los p-valor son mayores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

**Tabla 23**

*Prueba de Levene de igualdad de varianzas de la fitotoxicidad*

Fitotoxicidad	Estadístico de Levene	gl1	gl2	p-valor
Índice de germinación	1.57	2	6	0.28

De la Tabla 23, se deduce que la fitotoxicidad cumple con la homogeneidad de varianzas en cada grupo, ya que su p-valor es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

Posteriormente a la validación del cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se utilizó la prueba de ANOVA para determinar diferencias entre los 03 grupos de tratamiento (temperatura de pirólisis) de un factor o el efecto de este factor sobre la fitotoxicidad.

**Tabla 24***Prueba de ANOVA de un factor de la fitotoxicidad*

Índice de germinación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-valor
Entre grupos	5489.43	2	2744.71	6.72	0.03

De acuerdo a la Tabla 24, existen diferencias de índices de germinación entre los grupos de tratamiento, debido a que el p-valor es menor al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

Adicionalmente, se realizó la prueba post hoc HSD Tukey para mostrar las comparaciones entre los grupos de tratamiento.

**Tabla 25***Prueba post hoc HSD Tukey de la fitotoxicidad*

Tratamientos	Tratamientos	Diferencia de medias	Error estándar	p-valor
LS	B500	-53.36	16.50	0.041
	B700	-1.99	16.50	0.992
B500	LS	53.36	16.50	0.041
	B700	51.37	16.50	0.047
B700	LS	1.99	16.50	0.992
	B500	-51.37	16.50	0.047

De acuerdo a la Tabla 25, se evidencia que existen diferencias en el índice de germinación entre el lodo seco y el biocarbón de 500°C y entre el biocarbón de 500°C y 700°C, debido a que los p-valor son menores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ).

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### 6.1.1 Contrastación con la hipótesis general

**H<sub>0</sub>:** La pirólisis de lodos residuales de acuicultura no influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.

**H<sub>1</sub>:** La pirólisis de lodos residuales de acuicultura influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.

La pirólisis de lodos residuales de acuicultura influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo, debido a los efectos de la temperatura de pirólisis sobre las propiedades fisicoquímicas y la fitotoxicidad del biocarbón. Se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ).

#### 6.1.2 Contrastación con la hipótesis específica 1

**H<sub>0</sub>:** La temperatura de pirólisis no influye en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.

**H<sub>1</sub>:** La temperatura de pirólisis influye en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.

De los resultados de la prueba T de Student (Tabla 20) se deduce que el efecto de la temperatura de pirólisis es significativo ( $p$ -valor  $< 0.05$ ) en los parámetros fisicoquímicos de pH, C.E., H:C<sub>org</sub>, N total, humedad, ceniza y materia volátil; a excepción del C<sub>org</sub> y P total, que presentan un  $p$ -valor de 0.06 y 0.57, respectivamente ( $p$ -valor  $> 0.05$ ). Del resultado de la prueba de U de Mann-Whitney (Tabla 21) se deduce que el efecto de la temperatura de pirólisis es significativo ( $p$ -valor  $< 0.05$ ) en el parámetro K total. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ).

### **6.1.3 Contrastación con la hipótesis específica 2**

**H<sub>0</sub>:** La temperatura de pirólisis no influye en la fitotoxicidad del biocarbón.

**H<sub>1</sub>:** La temperatura de pirólisis influye en la fitotoxicidad del biocarbón.

De la prueba de ANOVA (Tabla 24) se deduce que el efecto de la temperatura de pirólisis es significativo ( $p$ -valor  $< 0.05$ ) en la fitotoxicidad del biocarbón. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ).

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

### **6.2.1 Propiedades fisicoquímicas del biocarbón de lodos residuales de acuicultura**

En la presente investigación se obtuvo un rendimiento de producción de 76.44 % para biocarbón producido a 500° y 71.89 % a 700 °C. La disminución de rendimiento de producción de biocarbón con el aumento de la temperatura de pirólisis es conocido a partir de experimentos realizados por diversos autores (Hossain et al. 2011; Phoungthong et al. 2018; Wang et al. 2019; Zhang, Qin, Yi 2020; Ferraro et al. 2021; Méndez et al. 2014). Los autores que aplicaron la misma temperatura de pirólisis de 500 °C para la producción de biocarbón fueron: Méndez et al. (2014), quien a partir de lodos del destintado de papel obtuvo biocarbón con un rendimiento del 72.55 %; Wang et al. (2019), quien obtuvo un rendimiento del 69.02 % al producir biocarbón a partir de lodos del proceso de teñido textil; Hossain et al. (2011), quien produjo biocarbón a partir de lodos de agua residual obtuvo un rendimiento del 57.9%; Phoungthong et al. (2018), por su parte logró un rendimiento del 51.3 % al elaborar biocarbón a partir de lodos de depuradora; Liang et al. (2016), quien recuperó un 36 % de biocarbón a partir de restos de poda; Zhang, Qin, Yi (2020), quien logró un rendimiento del 48 % a partir de lodos de agua dulce y finalmente Agrafioti et al. (2013), quien obtuvo un rendimiento del 27 % al producir biocarbón usando lodos de depuradora como materia prima. Así mismo, existen otras experiencias en las que investigadores han usado una temperatura de operación de 700 °C, tales

como Wang et al. (2019), quien obtuvo un rendimiento del 60.96 % al producir biocarbón a partir de lodos del proceso de teñido textil; Hossain et al. (2011), quien recuperó un 52.4 % a partir de lodos de agua residual; Phoungthong et al. (2018) logró un rendimiento del 46.3 % utilizando como biomasa lodos de depuradora; Sohaimi et al. (2017) utilizando lodo textil obtuvo un 45.49 % de biocarbón y finalmente Zhang, Qin, Yi (2020) quien logró un rendimiento del 43.18% a partir de lodos de agua dulce. De acuerdo a Zhang, Qin, Yi (2020), la disminución del rendimiento del biocarbón con el aumento de la temperatura se explica por las reacciones de polimerización/condensación y volatilización que se dan en la biomasa durante la pirólisis. Girón Merino (2020) por su parte, indica que existe una relación inversa entre el tiempo de pirólisis y el rendimiento de producción, además señala que el contenido de humedad de la biomasa al iniciar el proceso de pirólisis es un factor importante en el rendimiento resultante; ya que, si al iniciar el proceso éste fuera nula, se vería un aumento en el rendimiento de producción.

Los valores de pH obtenidos para el biocarbón de 500 °C y 700 °C fueron de 8.43 y 8.66, respectivamente. A nivel normativo, estos valores se encuentran en el rango establecido por la legislación italiana para biocarbón de origen vegetal, el cual indica que el pH debe estar entre 4 y 12 (Meyer et al. 2017). Como resultado del análisis estadístico, se demostró un aumento significativo del pH, y por ende de la alcalinidad del biocarbón con el aumento de la temperatura de pirólisis; resultados similares fueron reportados por Hossain et al. (2011) con un biocarbón de lodos de aguas residuales, obteniendo valores de pH de 7.27 y 12.00 a 500°C y 700 °C, respectivamente. Liang et al. (2016) reportó esta misma tendencia para un biocarbón de residuos de poda, obteniendo valores de 7.53 y 10.30 a 300 °C y 500 °C, respectivamente. Zhang, Qin, Yi (2020) para un biocarbón de lodos de una planta de potabilización de agua obtuvo valores de 7.63 y 7.78 a 500° C y 700 °C, respectivamente. A su vez, Méndez et al. (2014) para un biocarbón a partir de lodos de papel de destintado obtuvo valores de 7.59 y 9.40 a 300 °C y 500 °C, respectivamente; mientras que Wang et al. (2019) para un biocarbón de lodos de teñido textil reportó valores de

10.20 y 12.35 a 500 °C y 700 °C, respectivamente. Al mismo tiempo, Denyes et al. (2014) produjo biocarbón de astillas de madera a 500 °C y a 700°C obteniendo valores de pH de 8.70 y 9.00, respectivamente. Por el contrario, Videgain-Marco et al. (2020) para un biocarbón obtenido a partir de residuos de sarmientos de uva evidenció una leve reducción del pH ante el incremento de la temperatura de pirólisis, reportando valores de 8.6 y 8.57 a 400 °C y 600 °C, respectivamente. El valor de pH del biocarbón es una propiedad importante para aplicaciones agrícolas como la enmienda del suelo. Así mismo, es una de las propiedades en las que los productos carbonizados de la pirólisis difieren significativamente de los productos carbonizados producidos a través de la carbonización hidrotermal, ya que este último proceso implica la formación de ácidos orgánicos, lo que hace que el hidrocarbón sea ácido (Weber, Quicker 2018). El aumento del pH con la temperatura se debe a la separación de los grupos funcionales (reacciones de polimerización/condensación) (Zhang, Qin, Yi 2020) que son predominantemente de naturaleza ácida como los grupos carboxilos, hidroxilos o formilos que se desprenden de la biomasa cruda durante la pirólisis (Weber, Quicker 2018); así mismo, durante el proceso se enriquecen las sales de elementos alcalinos y alcalinotérreos. Estas sales incluyen (i) sales fácilmente solubles, (ii) carbonatos, (iii) óxidos e hidróxidos metálicos poco solubles y (iv) silicatos, estos últimos especialmente cuando las materias primas contienen partículas de tierra. La mayoría de estas sales proporcionan al biocarbón una alcalinidad considerable, aunque esto depende de la materia prima y del proceso de producción (Singh et al. 2017). Además, el contenido relativo de la ceniza, que también es de naturaleza básica, se incrementa durante el proceso. Por lo tanto, un mayor valor de pH es el resultado directo de un mayor grado de carbonización (Weber, Quicker 2018). Por otro lado, Sarfaraz et al. (2020) señala que el proceso de pirólisis destila los compuestos volátiles y ácidos produciendo el bioaceite o biogás, manteniendo los componentes alcalinos en la biomasa. De acuerdo con Denyes et al. (2014) un biocarbón con un pH alcalino (> 7), se puede agregar a suelos ácidos para aumentar el pH del suelo a niveles más apropiados para el crecimiento de las plantas. Así mismo, este puede ser aplicado como enmienda para suelos contaminados por ácidos (Wang et al. 2019). Por último,

según Brassard et al. (2019) el uso de biocarbón para aumentar la alcalinidad del suelo en lugar de óxido de calcio, puede ser ventajoso ya que este último puede reaccionar con 2 hidrógenos para producir H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>.

Los valores de conductividad eléctrica (CE) obtenidos corresponden a 207 y 277.83  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 500 °C y 700 °C, respectivamente, evidenciándose un aumento significativo al aumentar la temperatura de pirólisis. Estos valores no superan el valor establecido por la legislación italiana para biocarbón de origen vegetal (1000 mS/m  $\leftrightarrow$  10 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) según Meyer et al. (2017). La misma tendencia fue reportada por Liang et al. (2016), que para un biocarbón de residuos de poda obtuvo valores de 306 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 946 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 300 °C y 500 °C, respectivamente. Palacios Hugo (2019), produjo biocarbón de restos de poda a 300 °C y a 500°C obteniendo valores de C.E. de 1 633 y 2 013  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. Por otro lado, Hossain et al. (2011) para un biocarbón a partir de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas, evidenció una disminución de la C.E. ante el aumento de la temperatura de pirólisis, obteniendo los valores de 4 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 2 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 500 °C y 700 °C, respectivamente. Méndez et al. (2014), para un biocarbón a partir de lodos del destintado de papel, obtuvo valores de 768 y 755  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 500 °C y 700 °C, respectivamente. Según Singh et al. (2017), igual que el pH, la C.E. presente en un biocarbón depende también de la materia prima y de la temperatura de pirólisis. El biocarbón producido a temperaturas de pirólisis más altas generalmente tienen valores de C.E. más altos. Este efecto se le ha atribuido al aumento de la concentración de residuos o cenizas provocada por la pérdida de material volátil durante la pirólisis.

Los valores de contenido de carbono orgánico (C<sub>org</sub>) corresponden a 11.55 % y 13.81 %, respectivamente; siendo denominados como biocarbón de clase 3 ( $\geq 10$  % y  $< 30$  %), de acuerdo a International Biochar Initiative (2015). Así mismo, estos valores cumplen con el mínimo valor de C<sub>org</sub> que debe contener un biocarbón ( $\geq 10$  %) de acuerdo con “El Mandato Británico de Calidad de Biochar” (BQM por sus siglas en inglés) (Meyer et al. 2017). Los resultados

evidencian un ligero aumento del  $C_{org}$  al aumentar la temperatura, siendo este no significativo de acuerdo con el resultado de la estadística inferencial aplicada. En contraste con los resultados obtenidos, Liang et al. (2016) exhibe una disminución del contenido de  $C_{org}$  de 8.49 % a 4.70 % en el biocarbón elaborado a partir de restos de poda de parques y jardines a 300 °C y 500 °C, respectivamente. Denyes et al. (2014), obtuvo valores de  $C_{org}$  de 96.7 % y 97.8 % para un biocarbón producido a partir de astillas de madera a 500 °C y 700 °C, respectivamente. Palacios Hugo (2019), reportó valores de  $C_{org}$  de 65.22 % y 71.21 % para un biocarbón obtenido de restos de poda a 300 °C y 500°C. Según Brassard et al. (2019), el contenido de  $C_{org}$  corresponde a la fracción lábil del biocarbón que son biopolímeros pirolizados incompletos y compuestos orgánicos volátiles de bajo peso molecular.

La relación  $H:C_{org}$  del biocarbón obtenido a 500 °C y 700 °C corresponden a 0.13 y 0.08, respectivamente; normativamente estos resultados no exceden con el valor máximo (0.7) establecido por International Biochar Initiative (2015) y Carbon Standards International (2023). Se evidenció una disminución de la relación  $H:C_{org}$ , siendo afectado significativamente por el aumento de la temperatura de pirólisis. Esta tendencia concuerda con los resultados de Palacios Hugo (2019), quien obtuvo resultados de 0.30 y 0.60 para un biocarbón producido a partir de residuos agroforestales a 300 °C y 500 °C, respectivamente. Además, se cumple el criterio señalado por Brassard et al. (2019) donde una relación  $H:C_{org}$  de biocarbón menor a 0.4, indicaría que al menos el 70 % del carbono en el biocarbón permanecerá en el suelo durante más de 100 años. Según Palacios Hugo (2019), la relación  $H:C_{org}$  corresponde al grado de aromaticidad final del producto y mientras menor sea este valor, mayor será la estructura aromática; es decir, será más estable.

La relación  $H:C$  es un término que se usa a menudo para medir el grado de aromaticidad y maduración del biocarbón, relacionado con su estabilidad a largo plazo en el medio ambiente (Denes et al. 2014). En el presente estudio, la relación  $H:C$  del biocarbón producido fue afectado significativamente con la

temperatura de pirólisis; disminuyendo de 0.021 (500 °C) a 0.017 a (700 °C). Resultados similares fueron reportados por Ferraro et al. (2021), para un biocarbón producido a partir de pino negro, álamo y sauce, obteniendo valores de 0.03 y 0.02 a 550 °C y 650 °C, respectivamente. A su vez, Zhang, Qin, Yi (2020) evidenció también la misma tendencia para un biocarbón de lodos de una planta de potabilización de agua, obteniendo valores de 0.02 y 0.00 a 500 °C y 700 °C, respectivamente. Así mismo, Sohaimi et al. (2017) reportó valores de 0.13 y 0.05 a 400 °C y 700 °C, respectivamente. De acuerdo con Denyes et al. (2014), una relación H:C menor a 0.1 indica una estructura similar al grafito en el biocarbón. El principal proceso durante la carbonización es la descomposición térmica de la estructura de la biomasa, lo que resulta en el desprendimiento de grupos funcionales y la liberación de oxígeno e hidrógeno, dando como resultado un biocarbón con una relación H:C baja (lo que corresponde a un mayor grado de carbonización) conteniendo menos grupos funcionales y más estructuras aromáticas que un biocarbón obtenido a bajas temperaturas. Las estructuras aromáticas tienen una alta estabilidad termodinámica y, por lo tanto, son importantes para algunas aplicaciones, como enmiendas del suelo o propósitos metalúrgicos, donde se requiere la estabilidad a largo plazo del biocarbón (Weber, Quicker 2018).

El contenido de nitrógeno (N) del biocarbón se vio afectado significativamente con el aumento de la temperatura de pirólisis, obteniendo el valor de 0.72 % a 500 °C y disminuyendo a 0.31 % a 700 °C. La misma tendencia fue reportada por Videgain-Marco et al. (2020) quien reportó valores de 1.58 % y 1.52% con el aumento de la temperatura de pirólisis de 400 °C a 600 °C, respectivamente, para un biocarbón obtenido a partir de residuos de sarmientos de uva. A su vez, Zhang, Qin, Yi (2020) para un biocarbón de lodos de una planta de potabilización de agua obtuvo valores de 1.36% y 1.04% a 500 °C y 700 °C, respectivamente; señalando que esta disminución se debe a la volatilización y descomposición/disolución de nitrógeno orgánico durante la pirólisis. Así mismo, Wang et al. (2019) evidenció la misma disminución con valores de N de 0.83 % a 500 °C y 0.12% a 700 °C para biocarbón derivado del lodo de teñido de textiles;

señalando que la razón principal de este resultado fue la descomposición continua de la materia volátil en el lodo residual durante el proceso de pirólisis. La disminución del N durante el proceso de pirólisis está ligada a la pérdida de la fracción  $\text{NH}_4\text{-N}$  y  $\text{NO}_3\text{-N}$ , así como la pérdida de materia volátil que contiene grupos N a una temperatura de 200 °C, pero a medida que aumenta la temperatura (> 600 °C) se transforma gradualmente en piridina como estructura. El nitrógeno amónico ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) y el nitrógeno nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) son propiedades agronómicas importantes porque son las principales fuentes de N disponible para la absorción de las plantas. Es muy poco probable que el N total presente en el biocarbón esté completamente disponible para la absorción de la planta, ya que está unido orgánicamente en formas recalcitrantes (Hossain et al. 2011).

El contenido de fósforo total (P) del biocarbón de 500°C y 700 °C presentaron valores de 0.84 % y 0.80 %, respectivamente. Se evidenció una ligera disminución del P total, no siendo afectado significativamente por el aumento de la temperatura de pirólisis. Esta tendencia no coincide con los resultados obtenidos por Videgain-Marco et al. (2020), quien evidenció un aumento del P total con valores de 2.08 % y 2.45 % para biocarbón producido de sarmientos de uva a 400 °C y 600 °C, respectivamente. Sarfaraz et al. (2020) por su parte, reportó valores superiores de P total en biocarbón de estiércol de porcino (4,88 %) y biocarbón de cama de aves (3,33 %) y menores a los presentados para biocarbón de paja de maíz (0.45 %), a una temperatura de pirólisis de 450 °C. Velázquez Machuca et al. (2019), reportó valores de P total de 3.77 % y 4.88 % para un biocarbón a partir de lodos de PTAR urbano a 305 °C y 317 °C, respectivamente. Estudios nacionales como el de La Serna Cubas, Sanz Serrano (2020) obtuvieron valores de P total en un rango de 0.14 – 0.12 % para biocarbón producido a partir de tres variedades de *Theobroma cacao* L. en un rango de temperatura de 500 a 540 °C. Del mismo modo, Trujillo (2017) obtuvo un valor de 2.94 % para biocarbón de pollinaza producido en el rango de temperatura de 519 a 556 °C. De acuerdo a Sarfaraz et al. (2020), un biocarbón producido a bajas temperaturas tiene más P soluble que se vuelve insoluble a altas temperaturas. Así mismo, señala que valores altos de P pueden atribuirse

a la pérdida de C y la formación de P en formas estables. Por otro lado, La Serna Cubas, Sanz Serrano (2020), sostienen que la calidad de la materia y las condiciones del proceso de pirólisis determinan el contenido de P total, señalando además que teóricamente el P total se volatiliza por encima de los 700 – 800 °C.

El contenido de potasio total (K) del biocarbón de 500°C y 700 °C presentaron valores de 0.25 % y 0.34 %, respectivamente. Se evidenció un aumento del contenido de K total, siendo afectado significativamente por el aumento de la temperatura de pirólisis. Además, estos resultados obtenidos se encuentran dentro del rango promedio de la composición nutricional de distintas enmiendas orgánicas que se utilizan para mejorar la calidad del suelo Campos, Salazar Sperberg (2012). Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Videgain-Marco et al. (2020), quien obtuvo valores de 1.70 % y 2.10 % para biocarbón producido de sarmientos de uva a 400 °C y 600 °C, respectivamente. Por otro lado, Phoungthong et al. (2018) evidenció que el biocarbón producido a partir de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales presentó una disminución del K total al aumentar la temperatura de pirólisis de 500 °C a 700 °C, obteniendo valores de 0.79 % y 0.22 %, respectivamente. Sarfaraz et al. (2020) por su parte, reportó valores superiores de K total que variaron desde 0.69 % a 5.97 % en biocarbón de pajas de cultivos y de 2.66 % a 5.60 % en biocarbón de estiércol de animales a una temperatura de pirólisis de 450 °C. A su vez, Trujillo (2017) obtuvo un valor de K total de 6.54 % para un biocarbón producido a partir de pollinaza a temperaturas de 519 a 556 °C, determinando que el contenido de K total presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original. La Serna Cubas, Sanz Serrano (2020) presentó valores de K total en un rango de 9.61 % a 9.34 % de biocarbón producido a partir de biomasa residual de tres variedades de *Theobroma cacao* L. en un rango de temperatura de 500 a 540 °C.

El contenido de ceniza obtenido en la presente investigación fue de 4.88 % a 500 °C y 7.67 % a 700 °C, evidenciándose un aumento significativo con el

incremento de la temperatura de pirólisis. Esta misma tendencia fue evidenciada por Hossain et al. (2011) quien reportó valores de 68,2 % a 500 °C y 72,5 % a 700°C para un biocarbón producido a partir de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales urbana. A su vez, Videgain-Marco et al. (2020) reportó una tendencia similar con valores de 6.45 % a 400 °C y 10.02 % a 600 °C para biocarbón producido de sarmientos de uva. Liang et al. (2016) presentó valores de ceniza de 20.55 % y 22.46% a temperaturas de 300 °C y 500 °C, respectivamente. Por otro lado, Zhang, Qin, Yi (2020) obtuvo valores de 67.1 % a 500 °C y 81.33 % a 700 °C para biocarbón de lodos de una planta de potabilización, explicando que el alto contenido de ceniza fue por la pérdida de materia volátil y compuestos minerales retenidos. Denyes et al. (2014) señala que el contenido de ceniza es el componente inorgánico o mineral del biocarbón y que se obtendrán porcentajes bajos (< 2.5 %) cuando exista un alto porcentaje de carbono orgánico en el biocarbón, además que un bajo contenido de cenizas no proporciona cantidades sustanciales de nutrientes al suelo; sin embargo, el alto contenido de carbono brinda una mayor capacidad de retención de nutrientes a largo plazo en el suelo.

El contenido de humedad presente en el biocarbón fue de 0.78 % a 500 °C y aumentó a 0.96 % a 700 °C, mostrando una influencia significativa de la temperatura de pirólisis sobre este parámetro. La misma tendencia fue observada por Videgain-Marco et al. (2020) quien reportó valores de humedad de 0.57 % a 400 °C y 3.05 % a 600 °C para biocarbón producido de sarmientos de uva. A su vez, Palacios Hugo (2019) obtuvo una humedad del 3.31 % a 300 °C, la cual aumentó a 3.57 % a 500°C. De acuerdo a este último, el contenido de humedad se incrementa a mayor temperatura de pirólisis, debido a que los componentes lignocelulósicos que componen la biomasa se volatilizan en mayor medida y dejan los espacios que estos ocupaban.

El contenido de materia volátil resultante fue de 24.16 % y 20.19 % para el biocarbón de 500 °C y 700 °C, respectivamente. Se evidenció una disminución del contenido de materia volátil, siendo afectado significativamente por el

aumento de la temperatura de pirólisis. Esta misma tendencia se mostró en los resultados de Videgain-Marco et al. (2020), quien obtuvo valores de 1.70 % a 400 °C y 2.10 % a 600 °C para biocarbón producido de sarmientos de uva; así mismo Zhang, Qin, Yi (2020), quien obtuvo valores de 27.62 % a 14.10 % entre 500 °C a 700 °C para biocarbón de lodos de una planta de potabilización. A su vez, Liang et al. (2016), con valores de 24.57 % a 2.51 % entre 300 °C a 500 °C para biocarbón elaborado a partir de restos de poda. Según Denyes et al. (2014), un biocarbón con potencial como enmienda de suelo debe presentar un porcentaje de materia volátil inferior al 35%, ya que valores mayores inducen a una deficiencia de nitrógeno en el suelo. Además, se ha demostrado que niveles relativamente altos de materia volátil en el biocarbón pueden causar también un menor rendimiento en las plantas (Deenik et al. 2010).

### **6.2.2 Fitotoxicidad del biocarbón del biocarbón de lodos residuales de acuicultura**

De acuerdo a Liang et al. (2016), el índice de germinación (IG) es una medida integradora de compuestos de baja toxicidad (que afectan el crecimiento de las raíces) y alta toxicidad (que afectan la germinación). Según Zucconi et al. (1981) valores de IG por debajo del 50% son indicativos de alta fitotoxicidad, valores entre 50 y 80% son indicativos de fitotoxicidad moderada, valores superiores al 80% implican falta de fitotoxicidad, mientras que, si el IG supera el 100%, el material puede considerarse fitonutriente o fitoestimulante. En la presente investigación, el biocarbón producido a 500 °C tuvo un efecto fitoestimulante para las semillas de tomate (IG = 132.56%), en tanto que, el biocarbón producido a 700 °C obtuvo un valor de IG de 81.19 %, lo que significa que no presenta efectos fitotóxicos para las semillas de tomate. En contraste, el valor de IG para el lodo seco fue de 79.20 % lo que sugiere una moderada fitotoxicidad para las semillas de tomate. En comparación con otros estudios, el valor de IG reportado en el presente estudio para el biocarbón de 500 °C (IG = 132.56 %) fue mayor a lo reportado por Phoungthong et al. (2018), quien obtuvo un IG del 105 % en semillas de trigo para un biocarbón de lodos de depuradora a 500 °C; Videgain-Marco et al. (2020) reportó valores de IG de 111, 102, 92, 89

y 85 % para semillas de lechuga, albahaca, berro, cebada y sorgo, respectivamente, utilizando biocarbón de sarmientos de uva producido a una temperatura de 400 °C. Por su parte, Liang et al. (2016) obtuvo valores de IG de 170, 127, 87 y 68 en semillas de lechuga, berro, lenteja y tomate, respectivamente, para biocarbón de residuos de poda generados a una temperatura de 500 °C. Según Videgain-Marco et al. (2020), un alto contenido de cenizas en el biocarbón puede causar efectos negativos en la germinación y desarrollo de raíces debido al estrés salino.

### **6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

Los autores de la presente tesis titulada, “Pirólisis de lodos residuales de acuicultura y calidad del biocarbón como enmienda de suelo, Paríamarca, Canta – Lima” confirman su responsabilidad ética bajo el cumplimiento estricto del marco conductual dentro del desarrollo de la investigación, sus procesos, procedimientos y actividades enmarcados en el código de ética de la investigación de la UNAC, aprobado con la Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

## VII. CONCLUSIONES

1. Se determinó la influencia de la pirólisis de lodos residuales de acuicultura en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo, mediante la temperatura como un factor significativo en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón, demostrado con las pruebas estadísticas de T de Student y U de Mann Whitney; así como en la fitotoxicidad del biocarbón, demostrado con la prueba estadística de ANOVA.
2. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas de pirólisis 500 y 700 °C en las propiedades fisicoquímicas pH, conductividad eléctrica, relación H:C<sub>org</sub>, K total, humedad, ceniza y materia volátil, a excepción del C<sub>org</sub> y P total. El biocarbón de 500 °C resultó superior en la relación H:C<sub>org</sub> (0.13), H:C (0.021), N total (0.72%), P total (0.84%) y materia volátil (24.16%), mientras el biocarbón a 700 °C resultó superior en pH (8.66), C.E. (277.83 μS/cm), C<sub>org</sub> (13.81%), K total (0.34%), ceniza (7.67%) y humedad (0.96%).
3. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas de pirólisis 500 y 700 °C en la fitotoxicidad del biocarbón. El lodo seco, biocarbón de 500 °C y biocarbón de 700 °C obtuvieron un índice de germinación promedio de 79.20 %, 132.56 % y 81.19 %, respectivamente; en tanto el biocarbón de 500 °C presentó un mayor índice de germinación, siendo considerado como un fitonutriente o fitoestimulante (índice de germinación superior a 100 %).

## VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda, realizar un mayor número de réplicas en la prueba de fitotoxicidad; así como, realizar la prueba con otros tipos de semillas para observar la variabilidad de los efectos del biocarbón en cada especie.
2. Captar los gases condensables durante el proceso de pirólisis con el fin de producir bioaceite y determinar su calidad para uso como biocombustible.
3. Realizar estudios de pirólisis con factores como tiempo de residencia y velocidad de calentamiento, para determinar la influencia en la calidad del biocarbón de lodos residuales de acuicultura.
4. Realizar estudios de aplicación del biocarbón obtenido de la presente investigación para determinar la influencia en las características del suelo o la aplicación del biocarbón para asistir a la fitorremediación de especies vegetales en suelos contaminados.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREGO, J. et al., 2015. PHYTOTOXICITY OF SEWAGE SLUDGE BIOCHARS PREPARED AT DIFFERENT PYROLYSIS CONDITIONS. [DOCIART] *Artículos científicos, técnicos y divulgativos* [online]. Retrieved from : <http://hdl.handle.net/10532/2979>

AGRAFIOTI, Evita et al., 2013. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 101, pp. 72–78. DOI 10.1016/j.jaap.2013.02.010.

ÁLVAREZ VERDE, Claudio Abdon, 2012. Perú: ¿Acuicultura Sostenible? *Desarrollo Local Sostenible*. Vol. 5, pp. 1–13.

BISTA, Prakriti et al., 2019. Biochar Effects on Soil Properties and Wheat Biomass vary with Fertility Management. *Agronomy*. Vol. 9, no. 10. DOI 10.3390/agronomy9100623.

BLOK, Chris et al., 2019. ANALYTICAL METHODS USED WITH SOILLESS SUBSTRATES. In : *Soilless Culture: Theory and Practice*, pp. 509–564. 2. Elsevier B.V. ISBN 9780444636966. DOI 10.1016/B978-0-444-63696-6.00011-6.

BONNIE WAYCOTT, 2021. *Global Aquaculture Advocate*. .

BOSTOCK, John et al., 2010. Aquaculture: Global status and trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 365, no. 1554, pp. 2897–2912. DOI 10.1098/rstb.2010.0170.

BRASSARD, Patrick et al., 2019. Biochar for soil amendment. In : JEGUIRIM, Mejdí and LIMOUSY, Lionel (eds.), *Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications*, pp. 109–146. ISBN 9780128148945. DOI 10.1016/B978-0-12-814893-8.00004-3.

CAMPOS, Juan Hirzel and SALAZAR SPERBERG, Francisco, 2012. *Uso de enmiendas orgánicas como fuente de fertilización en cultivos*. . Ruiz.

CARBON STANDARDS INTERNATIONAL (CSI), 2023. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. . Vol. 10.3.

CHEN, Yi di et al., 2020. Production, properties, and catalytic applications of sludge derived biochar for environmental remediation. *Water Research*. Vol. 187, p. 22. DOI 10.1016/j.watres.2020.116390.

CHEN, Shulin, COFFIN, David E. and MALONE, Ronald F., 1997. Sludge production and management for recirculating aquacultural systems. *Journal of the World Aquaculture Society*. Vol. 28, no. 4, pp. 303–315. DOI 10.1111/j.1749-7345.1997.tb00278.x.

CLEMENTS, Donna P. and BIHN, Elizabeth A., 2019. The impact of food safety training on the adoption of good agricultural practices on farms. In : *Safety and Practice for Organic Food*, pp. 321–344. Elsevier Inc. ISBN 9780128120606. DOI 10.1016/B978-0-12-812060-6.00016-7.

CRIPPS, Simon J. and BERGHEIM, Asbjórn, 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*. Vol. 22, no. 1–2, pp. 33–56. DOI 10.1016/S0144-8609(00)00031-5.

DEENIK, Jonathan L. et al., 2010. Charcoal Volatile Matter Content Influences Plant Growth and Soil Nitrogen Transformations. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 74, no. 4, pp. 1259–1270. DOI 10.2136/sssaj2009.0115.

DEL CAMPO, L M et al., 2010. *Utilization of sludge from recirculation aquaculture systems* [online]. ISBN 9788272517549. Retrieved from : [www.nofima.no/filearchive/Rapport 09-2010.pdf](http://www.nofima.no/filearchive/Rapport%2009-2010.pdf)

DENYES, Mackenzie J. et al., 2014. Physical, chemical and biological characterization of six biochars produced for the remediation of contaminated sites. *Journal of visualized experiments: JoVE*. No. 93, p. e52183. DOI 10.3791/52183.

ESKANDARI, Samieh et al., 2019. Hydrochar-amended substrates for production of containerized pine tree seedlings under different fertilization regimes. *Agronomy*. Vol. 9, no. 7. DOI 10.3390/agronomy9070350.

EUROPEAN BIOCHAR FOUNDATION (EBC), 2012. *Guidelines for a Sustainable Production of Biochar* [online]. Arbaz. European Biochar Foundation (EBC). Retrieved from : <http://european-biochar.org>

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, no date. Residual waste sludge. *Terms Definition* [online]. Retrieved from : <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/residual-waste-sludge> [accessed 31 August 2021].

FAO, no date. Capítulo 4: Procesos de Carbonización. [online]. Retrieved from : <http://www.fao.org/3/X5328S/X5328S05.htm> [accessed 26 May 2021].

FERRARO, Giovanni et al., 2021. Biochar from lab-scale pyrolysis: influence of feedstock and operational temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*. DOI 10.1007/s13399-021-01303-5.

GIRÓN MERINO, Alvaro Nicolás, 2020. “Producción y caracterización del biocarbón de *Erythrina ulei* Harms, *Miconia amazónica* Triana y *Cecropia ficifolia* aff. *Warb. ex Snethl. con fines de enmienda*”. . Universidad Nacional Del Centro del Perú.

GLASER, Bruno et al., 2001. The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. Vol. 88, no. 1, pp. 37–41. DOI 10.1007/s001140000193.

HOSSAIN, Mustafa K. et al., 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*. Vol. 92, no. 1, pp. 223–228. DOI 10.1016/j.jenvman.2010.09.008.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2015. *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil* [online]. 2.1. 2.1. International Biochar Initiative. Retrieved from : [http://www.biochar-international.org/sites/default/files/Guidelines\\_for\\_Biochar\\_That\\_Is\\_Used\\_in\\_Soil\\_Final.pdf](http://www.biochar-international.org/sites/default/files/Guidelines_for_Biochar_That_Is_Used_in_Soil_Final.pdf)

KROISS, H, 2004. What is the potential for utilizing the resources in sludge ? *Water Science & Technology*. Vol. 49, no. 10, pp. 1–10.

LA SERNA CUBAS, Sulma Karina and SANZ SERRANO, Stefany Alexandra, 2020. *BIOCHAR A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL DE TRES VARIETADES*

*DE Theobroma cacao L. PROVENIENTE DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL DISTRITO DE JAÉN, AÑO 2019.* . Universidad Nacional de Jaén.

LEE, Jechan, SARMAH, Ajit K. and KWON, Eilhann E., 2018. Production and formation of biochar. In : SIK OK, Yong et al. (eds.), *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*, pp. 3–18. Elsevier Inc. ISBN 9780128117293. DOI 10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7.

LEHMANN, Johannes, GAUNT, John and RONDON, Marco, 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Vol. 11, no. 2, pp. 403–427. DOI 10.1007/s11027-005-9006-5.

LI, De Chang and JIANG, Hong, 2017. The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: A review on characterizations and mechanism elucidation. *Bioresource Technology*. Vol. 246, pp. 57–68. DOI 10.1016/j.biortech.2017.07.029.

LIANG, Chenfei et al., 2016. Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size. *Soil and Tillage Research*. Vol. 164, pp. 3–10. DOI 10.1016/j.still.2015.10.002.

LLOCLLA VEINTIMILLA, Arturo Steven and LOPEZ MEDINA, Darwyn Alex, 2019. *Evaluación del efecto de biocarbón obtenido a partir de residuos sólidos orgánicos del mercado central de Tumbes sobre la germinación y crecimiento de plantones de especies forestales Ceiba trichistandra y Bursera graveolens en etapa de vivero.* . Universidad Nacional de Tumbes.

MÉNDEZ, A. et al., 2014. Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 107, pp. 46–52. DOI 10.1016/j.jaap.2014.02.001.

MEYER, Sebastian et al., 2017. Biochar standardization and legislation harmonization. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. Vol. 25, no. 2, pp. 175–191. DOI 10.3846/16486897.2016.1254640.

MINISTERIO DE LA PRODUCCION, 2016. *Aprueban el Reglamento de la Ley General de Acuicultura, aprobada por el Decreto Legislativo N° 1195*. . Peru.

MUKHOPADHYAY, S. et al., 2018. Application of Soil Quality Indicators for the Phytorestoration of Mine Spoil Dumps. In : PANDEY, Vimal Chandra and BAUDDH, Kuldeep (eds.), *Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation*, pp. 361–388. Elsevier. ISBN 9780128139134. DOI 10.1016/B978-0-12-813912-7.00014-4.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2011. What is aquaculture ? [online]. 2011. Retrieved from : <https://www.noaa.gov/stories/what-is-aquaculture>

PALACIOS HUGO, Rosario Natividad, 2019. *“Estabilidad y calidad de Biochar de residuos agroforestales de la UNALM”*. .

PHOUNGTHONG, Khamphe et al., 2018. Leaching characteristics and phytotoxic effects of sewage sludge biochar. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Vol. 20, no. 4, pp. 2089–2099. DOI 10.1007/s10163-018-0763-0.

PODER EJECUTIVO, Republica del Perú, 2015. *Decreto Legislativo N ° 1195*. .  
Peru.

RACIOPPI, Marco et al., 2020. Response of ancient and modern wheat varieties to biochar application: Effect on hormone and gene expression involved in germination and growth. *Agronomy*. Vol. 10, no. 1. DOI 10.3390/agronomy10010005.

RAHEEM, Abdul et al., 2018. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 337, pp. 616–641. DOI 10.1016/j.cej.2017.12.149.

RAJKOVICH, Shelby et al., 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*. Vol. 48, no. 3, pp. 271–284. DOI 10.1007/s00374-011-0624-7.

RONGA, Domenico et al., 2019. Valorization of Vineyard By-Products to Obtain Composted Digestate and Biochar Suitable for Nursery Grapevine (*Vitis vinifera* L.) Production. *Agronomy*. Vol. 9, no. 8. DOI 10.3390/agronomy9080420.

SARFARAZ, Qamar et al., 2020. Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. *Scientific Reports*. Vol. 10, no. 1, pp. 2–10. DOI 10.1038/s41598-020-57987-8.

SHACKLEY, Simon et al., 2016. *Biochar in European soils and agriculture: Science and practice*. 1st Editio. London : Routledge. ISBN 9781134654871.

SHARMA, S. P., 2018. Biochar for carbon sequestration: Bioengineering for sustainable environment. In : BARH, Debmalya and AZEVEDO, Vasco (eds.),

*Omics Technologies and Bio-engineering: Volume 2: Towards Improving Quality of Life*, pp. 365–385. Elsevier Inc. ISBN 9780128158708. DOI 10.1016/B978-0-12-815870-8.00020-6.

SINGH, Balwant et al., 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. In : *Biochar: A Guide to Analytical Methods*, pp. 23–38. CSIRO PUBLISHING.

SOHAIMI, K. S.A. et al., 2017. Synthesis, characterization and application of textile sludge biochars for oil removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 5, no. 2, pp. 1415–1422. DOI 10.1016/j.jece.2017.02.002.

SUMMERFELT, Steven T, ADLER, Paul R and GLENN, D Michael, 1998. Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands. *Aquacultural Engineering* [online]. Vol. 19, pp. 1–12. Retrieved from : [papers2://publication/uuid/AA67D26B-D6CD-4554-8D47-B9B402BF2C61](https://papers2://publication/uuid/AA67D26B-D6CD-4554-8D47-B9B402BF2C61)

TRUJILLO, Enmer, 2017. *Produccion y caracterizacion de biochar a partir de residuos organicos avicolas*. . Universidad Nacional Agraria La Molina.

VELÁZQUEZ MACHUCA, Martha Alicia et al., 2019. Physical and chemical characterization of residual sludge biochar. *Terra Latinoamericana*. Vol. 37, no. 3, pp. 243–251. DOI 10.28940/terra.v37i3.409.

VIDEGAIN-MARCO, María et al., 2020. Effects of Biochar Application in a Sorghum Crop under Greenhouse Conditions: Growth Parameters and Physicochemical Fertility. *Agronomy*. Vol. 10, no. 1, p. 104. DOI 10.3390/agronomy10010104.

WANG, J. Y. et al., 2004. Biotechnology of intensive aerobic conversion of sewage sludge and food waste into fertilizer. *Water Science and Technology*. Vol. 49, no. 10, pp. 147–154. DOI 10.2166/wst.2004.0631.

WANG, Xingdong et al., 2019. Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and risk evaluation of heavy metals in biochar derived from textile dyeing sludge. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 168, pp. 45–52. DOI 10.1016/j.ecoenv.2018.10.022.

WEBER, Kathrin and QUICKER, Peter, 2018. Properties of biochar. *Fuel*. Vol. 217, no. December 2017, pp. 240–261. DOI 10.1016/j.fuel.2017.12.054.

XIAO, Xin, CHEN, Baoliang and ZHU, Lizhong, 2014. Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures. *Environmental Science and Technology*. Vol. 48, no. 6, pp. 3411–3419. DOI 10.1021/es405676h.

XIAO, Xin et al., 2018. Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review. *Environmental Science and Technology*. Vol. 52, no. 9, pp. 5027–5047. DOI 10.1021/acs.est.7b06487.

YAASHIKAA, P. R. et al., 2020. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*. Vol. 28, p. 15. DOI 10.1016/j.btre.2020.e00570.

YUAN, Haoran et al., 2015. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 112, pp. 284–289. DOI 10.1016/j.jaap.2015.01.010.

ZECH, Wolfgang, HAUMAIER, Ludwig and HEMPFLING, Reinhold, 1990. Ecological aspects of soil organic matter in tropical land use. In : WOLFGANG, Zech, LUDWIG, Haumaier and REINHOLD, Hempfling (eds.), *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Readings*, pp. 187–202. ACSESS Publications. ISBN 9780891188742. DOI 10.2136/1990.humicsubstances.c8.

ZHANG, Yunhui, QIN, Junde and YI, Yaolin, 2020. Biochar and hydrochar derived from freshwater sludge: Characterization and possible applications. *Science of the Total Environment*. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.144550.

ZUCCONI, F. et al., 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*. Vol. 2, pp. 54–57.

## ANEXOS

### Anexo 1: Matriz de consistencia

**“PIRÓLISIS DE LODOS RESIDUALES DE ACUICULTURA Y CALIDAD DEL BIOCARBÓN COMO ENMIENDA DE SUELO, PARIAMARCA, CANTA-LIMA”**

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿En qué medida la pirólisis de lodos residuales de acuicultura influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Determinar la influencia de la pirólisis de lodos residuales de acuicultura en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>La pirólisis de lodos residuales de acuicultura influye en la calidad del biocarbón como enmienda de suelo.</p>	<p><b>Independiente:</b></p> <p>Pirólisis de lodos residuales de acuicultura</p>	<p>Condición del proceso</p>	<p>Temperatura</p>	<p><b>Tipo</b></p> <p>Básica</p> <p><b>Enfoque</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>Nivel</b></p> <p>Explicativo</p> <p><b>Diseño de</b></p>
<p><b>Problemas específicos</b></p> <p>¿En qué medida la temperatura de pirólisis influye en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón?</p> <p>¿En qué medida la temperatura de pirólisis influye en la fitotoxicidad del biocarbón?</p>	<p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>Determinar la influencia de la temperatura de la pirólisis en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.</p> <p>Determinar la influencia de la temperatura de pirólisis en la fitotoxicidad del biocarbón.</p>	<p><b>Hipótesis Específica</b></p> <p>La temperatura de pirólisis influye en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón.</p> <p>La temperatura de pirólisis influye en la fitotoxicidad del biocarbón.</p>	<p><b>Dependiente:</b></p> <p>Calidad del biocarbón como enmienda de suelo</p>	<p>Propiedades fisicoquímicas</p>	<p>pH</p> <p>Conductividad eléctrica</p> <p>Carbono orgánico (C<sub>org</sub>)</p> <p>Relación H:C<sub>org</sub></p> <p>N, P, K</p> <p>Humedad</p> <p>Ceniza</p> <p>Materia volátil</p>	<p><b>Investigación</b></p> <p>Experimental</p> <p><b>Método de investigación</b></p> <p>Hipotético – deductivo</p> <p><b>Técnica</b></p> <p>Observación-documentario</p>
				Fitotoxicidad	Índice de germinación	

## Anexo 2: Base de datos

**Tabla 26**

*Base de datos de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón*

Parámetro	Tratamiento					
	B500-1	B500-2	B500-3	B700-1	B700-2	B700-3
pH	8.26	8.41	8.35	8.72	8.68	8.58
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	208.30	206.60	206.10	266.50	288.70	278.30
Carbono inorgánico (%)	58.30	57.60	55.00	49.00	50.00	51.00
Carbono total (%)	69.02	68.50	68.03	63.48	63.88	64.07
Hidrógeno total (%)	1.50	1.42	1.49	1.00	1.10	1.15
Azufre total (%)	0.36	0.32	0.31	0.28	0.32	0.30
Nitrógeno total (%)	0.76	0.72	0.68	0.28	0.32	0.34
Fósforo total (%)	0.84	0.80	0.88	0.85	0.87	0.68
Potasio total (%)	0.27	0.24	0.24	0.33	0.33	0.36
Humedad (%)	0.79	0.78	0.77	0.92	0.97	0.98
Ceniza (%)	4.73	4.05	5.86	7.32	7.98	7.70
Materia volátil (%)	22.43	24.43	25.61	20.75	21.00	18.83
Carbono orgánico (%)	10.72	10.90	13.03	14.48	13.88	13.07
H:C <sub>org</sub>	0.14	0.13	0.11	0.07	0.08	0.09
H:C	0.022	0.021	0.022	0.016	0.017	0.018

*Nota.* B500: Biocarbón obtenido a 500 °C, B700: Biocarbón obtenido a 700 °C

**Tabla 27***Base de datos de la prueba de fitotoxicidad*

B500					
REPETICIÓN 1	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 2	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 3	N° Semillas germinadas
	6		6		4
	Longitud de las raíces		Longitud de las raíces		Longitud de las raíces
Semilla 1	5.50	Semilla 1	6.00	Semilla 1	2.90
Semilla 2	2.20	Semilla 2	2.10	Semilla 2	3.00
Semilla 3	2.50	Semilla 3	1.80	Semilla 3	3.50
Semilla 4	2.10	Semilla 4	2.00	Semilla 4	3.10
Semilla 5	1.40	Semilla 5	1.20	Semilla 5	-
Semilla 6	0.20	Semilla 6	0.50	Semilla 6	-
Semilla 7	-	Semilla 7	-	Semilla 7	-
Semilla 8	-	Semilla 8	-	Semilla 8	-
Semilla 9	-	Semilla 9	-	Semilla 9	-
Semilla 10	-	Semilla 10	-	Semilla 10	-
L prom	2.32	L prom	2.27	L prom	3.13
G prom	60.00	G prom	60.00	G prom	40.00
L/L0	2.07	L/L0	2.03	L/L0	2.80
G/G0	0.67	G/G0	0.67	G/G0	0.44
IG	138.19	IG	135.21	IG	124.28

B700					
REPETICIÓN 1	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 2	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 3	N° Semillas germinadas
	7		4		3
	Longitud de las raíces		Longitud de las raíces		Longitud de las raíces
Semilla 1	2.90	Semilla 1	3.2	Semilla 1	5.30
Semilla 2	0.50	Semilla 2	2.6	Semilla 2	2.40
Semilla 3	0.10	Semilla 3	2.6	Semilla 3	3.10
Semilla 4	0.10	Semilla 4	0.2	Semilla 4	-
Semilla 5	1.40	Semilla 5	-	Semilla 5	-
Semilla 6	0.20	Semilla 6	-	Semilla 6	-
Semilla 7	0.20	Semilla 7	-	Semilla 7	-
Semilla 8	-	Semilla 8	-	Semilla 8	-
Semilla 9	-	Semilla 9	-	Semilla 9	-
Semilla 10	-	Semilla 10	-	Semilla 10	-
L prom	0.77	L prom	2.15	L prom	3.50
G prom	70.00	G prom	40.00	G prom	30.00
L/L0	0.69	L/L0	1.92	L/L0	3.13
G/G0	0.78	G/G0	0.44	G/G0	0.33
IG	53.69	IG	85.50	IG	104.39

LODO SECO					
REPETICIÓN 1	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 2	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 3	N° Semillas germinadas
	7		6		3
	Longitud de las raíces		Longitud de las raíces		Longitud de las raíces
Semilla 1	3.1	Semilla 1	3.8	Semilla 1	2.1
Semilla 2	1.8	Semilla 2	2.6	Semilla 2	1.9
Semilla 3	1.5	Semilla 3	2.2	Semilla 3	1.5
Semilla 4	0.9	Semilla 4	1.2	Semilla 4	-
Semilla 5	0.7	Semilla 5	0.1	Semilla 5	-
Semilla 6	0.3	Semilla 6	0.1	Semilla 6	-
Semilla 7	0.1	Semilla 7	-	Semilla 7	-
Semilla 8	-	Semilla 8	-	Semilla 8	-
Semilla 9	-	Semilla 9	-	Semilla 9	-
Semilla 10	-	Semilla 10	-	Semilla 10	-
L prom	1.20	L prom	1.67	L prom	1.83
G prom	70.00	G prom	60.00	G prom	30.00
L/L0	1.07	L/L0	1.49	L/L0	1.64
G/G0	0.78	G/G0	0.67	G/G0	0.33
IG	83.51	IG	99.42	IG	54.68

CONTROL					
REPETICIÓN 1	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 2	N° Semillas germinadas	REPETICIÓN 3	N° Semillas germinadas
	8		10		9
	Longitud de las raíces		Longitud de las raíces		Longitud de las raíces
Semilla 1	1.5	Semilla 1	2.2	Semilla 1	1.5
Semilla 2	1.9	Semilla 2	2.1	Semilla 2	1.3
Semilla 3	3.2	Semilla 3	1.4	Semilla 3	0.8
Semilla 4	0.9	Semilla 4	1,5	Semilla 4	0.2
Semilla 5	0.8	Semilla 5	1.3	Semilla 5	0.4
Semilla 6	1.8	Semilla 6	1.5	Semilla 6	0.1
Semilla 7	1.2	Semilla 7	0.8	Semilla 7	0.1
Semilla 8	1.3	Semilla 8	0.3	Semilla 8	1.1
Semilla 9	-	Semilla 9	0.3	Semilla 9	0.2
Semilla 10	-	Semilla 10	0.4	Semilla 10	-
L prom	1.58	L prom	1.14	L prom	0.63
G prom	80.00	G prom	100.00	G prom	90.00
L0	1.12				
G0	90.00				

## Anexo 3: Informe de ensayo



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

### INFORME DE ENSAYO IE-2023-1142

#### 1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : DAVID SALAZAR BUSTAMANTE  
1.2 RUC o DNI : 48437186  
1.3 Dirección : No Precisa

#### 2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : CARBÓN  
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)  
2.3 Número de Muestras : 06  
2.4 Fecha de Recepción : 2023-07-17  
2.5 Periodo de Ensayo : 2023-07-17 al 2023-07-27  
2.6 Fecha de Emisión : 2023-08-15  
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Indica  
2.8 N° de cotización : COT-115980-SL23

#### 3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Azufre, %	ASTM D4239
Hidrógeno, % H	ASTM D 3178
Nitrógeno, %N	ASTM D 5373
Carbono, %C	ASTM D 5373
Carbono Inorgánico, %	ASTM D4373 Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils
Fósforo Total	Absorción Atómica
Potasio Total	Absorción Atómica
Determinación de Humedad, Porcentaje Volátil y Ceniza, %	ASTM D1762 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal

  
DIEGO ROMÁN VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

**4. RESULTADOS**

**4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA:**

Código de Laboratorio	Descripción de muestras
S-1880	BIOCARBÓN B500-1 PESO: 100 G <sup>(C)</sup>
S-1881	BIOCARBÓN B500-2 PESO: 100 G <sup>(C)</sup>
S-1882	BIOCARBÓN B500-3 PESO: 100 G <sup>(C)</sup>
S-1883	BIOCARBÓN B700-1 PESO: 100 G <sup>(C)</sup>
S-1884	BIOCARBÓN B700-2 PESO: 100 G <sup>(C)</sup>
S-1885	BIOCARBÓN B700-3 PESO: 100 G <sup>(C)</sup>

**Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA S-1880**

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1880	Azufre, S	%	N.A.	0.36
	Hidrógeno, H	%	N.A.	1.50
	Nitrógeno, N	%	N.A.	0.76
	Carbono, C	%	N.A.	69.02
	Carbono Inorgánico, C	%	N.A.	58.30
	Fósforo Total, P	%	N.A.	0.84
	Potasio Total, K	%	N.A.	0.27
	Humedad	%	N.A.	0.79
	Ceniza	%	N.A.	4.73
	Materia Volátil	%	N.A.	22.43

**Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA S-1881**

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1881	Azufre, S	%	N.A.	0.32
	Hidrógeno, H	%	N.A.	1.42
	Nitrógeno, N	%	N.A.	0.72
	Carbono, C	%	N.A.	68.50
	Carbono Inorgánico, C	%	N.A.	57.60
	Fósforo Total, P	%	N.A.	0.80
	Potasio Total, K	%	N.A.	0.24
	Humedad	%	N.A.	0.78
	Ceniza	%	N.A.	4.05
	Materia Volátil	%	N.A.	24.43

INFORME DE ENSAYO IE-2023-1142

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA S-1882

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1882	Azufre, S	%	N.A.	0.31
	Hidrógeno, H	%	N.A.	1.49
	Nitrógeno, N	%	N.A.	0.68
	Carbono, C	%	N.A.	68.03
	Carbono Inorgánico, C	%	N.A.	55.00
	Fósforo Total, P	%	N.A.	0.88
	Potasio Total, K	%	N.A.	0.24
	Humedad	%	N.A.	0.77
	Ceniza	%	N.A.	5.86
	Materia Volátil	%	N.A.	25.61

Tabla N°4: RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA S-1883

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1883	Azufre, S	%	N.A.	0.28
	Hidrógeno, H	%	N.A.	1.00
	Nitrógeno, N	%	N.A.	0.28
	Carbono, C	%	N.A.	63.48
	Carbono Inorgánico, C	%	N.A.	49.00
	Fósforo Total, P	%	N.A.	0.85
	Potasio Total, K	%	N.A.	0.33
	Humedad	%	N.A.	0.92
	Ceniza	%	N.A.	7.32
	Materia Volátil	%	N.A.	20.75

Tabla N°4: RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA S-1884

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1884	Azúfre, S	%	N.A.	0.32
	Hidrógeno, H	%	N.A.	1.10
	Nitrógeno, N	%	N.A.	0.32
	Carbono, C	%	N.A.	63.88
	Carbono Inorgánico, C	%	N.A.	50.00
	Fósforo Total, P	%	N.A.	0.87
	Potasio Total, K	%	N.A.	0.33
	Humedad	%	N.A.	0.97
	Ceniza	%	N.A.	7.98
	Materia Volátil	%	N.A.	21.00

Tabla N°4: RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA S-1885

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1885	Azúfre, S	%	N.A.	0.30
	Hidrógeno, H	%	N.A.	1.15
	Nitrógeno, N	%	N.A.	0.34
	Carbono, C	%	N.A.	64.07
	Carbono Inorgánico, C	%	N.A.	51.00
	Fósforo Total, P	%	N.A.	0.68
	Potasio Total, K	%	N.A.	0.36
	Humedad	%	N.A.	0.98
	Ceniza	%	N.A.	7.70
	Materia Volátil	%	N.A.	18.83

**Leyenda**

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

N.A. No Aplica.

(c) Información suministrada por el cliente.

El presente Informe reemplaza a: IE-2023-1043

**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.

## Anexo 4: Certificado de calibración de equipos

### a. Balanza analítica



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO  
POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL-DA CON REGISTRO N° LC - 052



## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LMCA-0149-2023

Expediente : 001119

Fecha de emisión : 2023-06-23

1. Solicitante : SISTEMA DE SERVICIOS Y ANALISIS QUIMICOS S.A.C.

Dirección : CAL.22 MZA. E LOTE. 07 URB. VIPOL NARANJAL LIMA - LIMA - SAN MARTIN DE PORRES

2. Instrumento calibrado : **BALANZA**

Marca : BOECO

Modelo : BAS 32 plus

N° de serie : 581242 / 18

Identificación : LAB-09

Procedencia : Alemania

Capacidad máxima : 110 g

División de escala (d) : 0,0001 g

División de verificación (e) : 0,001 g

Capacidad mínima : 0,01 g

Tipo : Electrónica

Clase de exactitud : I

3. Lugar de calibración : Instalaciones de SLab Perú S.A.C. - Sala de Balanza

4. Fecha de calibración : 2023-06-22

5. Método de calibración :

La calibración se realizó por comparación directa entre las indicaciones de lectura de la balanza y las cargas aplicadas mediante pesas patrones siguiendo el procedimiento PC-011 "Procedimiento de calibración de balanzas de funcionamiento no automático clase I y II". Cuarta edición, 2010. INDECOPI.

6. Trazabilidad :

Código	Descripción	Certificado de calibración
PTM-006	Juego de pesas de 1 mg a 200 g de clase E2	CCP-1311-001-22 / Elicrom

Meyler Villalobos Bravo  
Responsable de Laboratorio de  
Masa y Volumen

Página 1 de 3

Los resultados presentados corresponden sólo al ítem calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.

El certificado de calibración es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia. Sin perjuicio de lo señalado, dicho uso puede configurar por sus efectos una infracción a las normas de protección al consumidor y las que regulan la libre competencia.

Al usuario le corresponde disponer en su momento la ejecución de una nueva calibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

ALAB E.I.R.L. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente, excepto con autorización expresa por escrito de ALAB E.I.R.L.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del responsable técnico de ALAB E.I.R.L.

#### SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca N° 1877, Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 717 5802 - Cel.: 977 515 129

[www.alab.com.pe](http://www.alab.com.pe)



Certificado de calibración N° LMCA-0149-2023

Página 3 de 3

Ensayo de Pesaje

	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>		<b>Inicial</b>	<b>Final</b>
<b>Temperatura</b>	22,06 °C	22,12 °C	<b>Humedad</b>	58,40 %	59,80 %

Carga L g	Carga creciente				Carga decreciente				EMP g
	R g	ΔL g	E g	Ec g	R g	ΔL g	E g	Ec g	
0,00100	0,0009	-	-0,00010	0,00000	0,0098	-	-0,00020	-0,00010	0,00100
0,01000	0,0099	-	-0,00010	0,00000	0,0498	-	-0,00020	-0,00010	0,00100
0,05000	0,0499	-	-0,00010	0,00000	0,0998	-	-0,00020	-0,00010	0,00100
0,10000	0,0999	-	-0,00010	0,00000	0,0998	-	-0,00020	-0,00010	0,00100
0,50000	0,4999	-	-0,00010	0,00000	0,4998	-	-0,00020	-0,00010	0,00100
1,00001	0,9999	-	-0,00011	-0,00001	0,9998	-	-0,00021	-0,00011	0,00100
2,00001	1,9999	-	-0,00011	-0,00001	1,9998	-	-0,00021	-0,00011	0,00100
5,00001	4,9999	-	-0,00011	-0,00001	4,9998	-	-0,00021	-0,00011	0,00100
15,00001	15,0000	-	-0,00001	0,00009	14,9999	-	-0,00011	-0,00001	0,00100
20,00002	20,0000	-	-0,00002	0,00008	20,0000	-	-0,00002	0,00008	0,00100
25,00002	25,0001	-	0,00008	0,00018	25,0001	-	0,00008	0,00018	0,00100
30,00002	30,0001	-	0,00008	0,00018	30,0002	-	0,00018	0,00028	0,00100
50,00002	50,0004	-	0,00038	0,00048	50,0003	-	0,00028	0,00038	0,00100
70,00004	70,0006	-	0,00056	0,00066	70,0006	-	0,00056	0,00066	0,00200
100,00003	100,0005	-	0,00047	0,00057	100,0005	-	0,00047	0,00057	0,00200
110,00003	110,0007	-	0,00067	0,00077	110,0007	-	0,00067	0,00077	0,00200

L: Carga puesta sobre la plataforma de la balanza  
R: Lectura de indicación de la balanza  
E: Error encontrado  
EMP: Error máximo permitido

E<sub>0</sub>: Error en cero  
Ec: Error corregido  
ΔL: Carga incrementada

LECTURA CORREGIDA E INCERTIDUMBRE DE LA PESADA

$$\text{Incertidumbre expandida de medición} \quad U_R = 2 \times \sqrt{2,6 \times 10^{-9} \text{ g}^2 + 1,0 \times 10^{-11} \times R^2}$$

$$\text{Lectura corregida de la balanza} \quad R_{\text{corregida}} = R - 7,4499 \times 10^{-6} \times R$$

R: Indicación de la lectura de la balanza en g

9. Observaciones :

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO" y N° EM-00484.
- La incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura k = 2 que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %.
- En el caso de ser necesario, ajustar la indicación en cero antes de cada medición.
- Antes de la calibración se realizó el ajuste del equipo. Para una carga de 110 g la indicación de la balanza fue de 110,0030 g.
- El valor de "e", capacidad mínima y la clase de exactitud se han determinado de acuerdo a la NMP-003 "Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático."

FIN DEL DOCUMENTO

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chataca N° 1877, Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 717 5802 - Cel.: 977 515 129

[www.alab.com.pe](http://www.alab.com.pe)

## b. Estufa



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO  
POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN A2LA  
CON CERTIFICADO #6032.01 SEGÚN ISO/IEC 17025:2017



### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LTCA-0223-2023

Página 1 de 8

- Expediente : 001119
- Fecha de emisión : 2023-06-24
1. Solicitante : SISTEMA DE SERVICIOS Y ANALISIS QUIMICOS S.A.C.
- Dirección : CAL.22 MZA. E LOTE. 07 URB. VIPOL NARANJAL LIMA - LIMA - SAN MARTIN DE PORRES
2. Instrumento calibrado : ESTUFA
- Marca : MEMMERT
- Modelo : UF 55
- Nº de serie : B222.3376
- Código : LAB-117
- Indicador : Digital
- Alcance del indicador : 20 °C a 99,9 °C / 100 °C a 300 °C
- Resolución del indicador : 0,1 °C / 0,5 °C
- Selector : Digital
- Alcance del selector : 20 °C a 99,9 °C / 100 °C a 300 °C
- Resolución del selector : 0,1 °C / 0,5 °C
- Carga : 10 vasos precipitados
- Porcentaje de carga : 50%
- Tipo de ventilación : Forzada
- Ubicación : Sala de Ensayo 2
- Temperaturas de Trabajo : 104 °C ± 1 °C, 140 °C ± 2 °C, 180 °C ± 2 °C
3. Lugar de calibración : Instalaciones de SLAB Perú S.A.C.
4. Fecha de calibración : 2023-06-22 al 2023-06-23
5. Método de calibración :

Los resultados presentados corresponden sólo al item calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con nombres de productos.

El certificado de calibración es un documento oficial de interés público, su autenticación o uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia. Sin perjuicio de lo señalado dicho uso puede configurar por sus efectos una infracción a las normas de protección al consumidor y las que regulan la libre competencia.

Al usuario le corresponde disponer en su momento de la garantía de una nueva calibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

ALAB E.I.R.L. no se responsabiliza de los perjuicios que puede ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales reúnen las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente, excepto con autorización expresa por escrito de ALAB E.I.R.L.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del responsable técnico de ALAB E.I.R.L.

La calibración se realizó por comparación directa siguiendo el PC-018 "Procedimiento para la calibración o caracterización de medios isotermos con aire como medio termostático". Segunda Edición, 2009 INDECOPI/SNM (Validado).

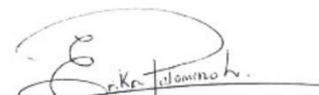
#### 6. Trazabilidad

Los resultados de la calibración realizada tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL - DM, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) y el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).

Código	Descripción	Certificado de calibración
PTT 017	Termómetro Multicanal con incertidumbre "U" de 0,069 °C a 0,087 °C	LTA 0151 2022

#### 7. Condiciones de calibración

	Inicial	Final		Inicial	Final
Temperatura ambiental	22,0 °C	22,8 °C	Voltaje	220 V	220 V
Humedad relativa	57,8 %	63,0 %			

  
Erika M. Palomino Limache  
Responsable de Laboratorio

Av. Guardia Chalco N° 1677 Bellavista - Callao  
Tel: 01 717 5602 / 01 717 5803 / Cel: 961786826  
www.alab.com.pe

8. Resultados de la calibración

Tiempo de calibración: 60 minutos

Posición del selector: 104 °C

Tiempo de calentamiento y estabilización: 90 minutos

Para la temperatura de 104 °C ± 1 °C

Tiempo (min)	Temp. Del equipo (°C)	MEDICIONES DE PATRONES (°C)										Temp. Promedio (°C)	T <sub>max</sub> -T <sub>min</sub> (°C)
		NIVEL SUPERIOR					NIVEL INFERIOR						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
00	104,0	104,07	103,78	103,67	104,40	104,25	103,81	103,71	104,40	104,32	104,06	104,05	0,73
02	104,0	104,20	103,88	103,85	104,50	104,22	103,88	103,77	104,46	104,39	104,09	104,13	0,73
04	104,0	104,11	103,81	103,83	104,41	104,19	103,86	103,66	104,43	104,35	104,08	104,07	0,77
06	104,0	104,04	103,75	103,80	104,44	104,16	103,80	103,69	104,38	104,28	104,02	104,04	0,75
08	104,0	104,11	103,87	103,86	104,41	104,22	103,92	103,74	104,46	104,34	104,04	104,10	0,72
10	104,0	104,10	103,85	103,80	104,40	104,18	103,87	103,72	104,43	104,36	104,11	104,08	0,71
12	104,0	104,10	103,76	103,88	104,40	104,21	103,82	103,71	104,46	104,35	104,06	104,08	0,75
14	104,0	104,08	103,84	103,74	104,43	104,22	103,88	103,70	104,42	104,35	104,09	104,08	0,73
16	104,0	104,08	103,90	103,73	104,43	104,20	103,84	103,68	104,41	104,33	104,06	104,07	0,75
18	104,0	104,07	103,74	103,69	104,44	104,18	103,77	103,70	104,39	104,30	104,03	104,03	0,75
20	104,0	104,07	103,75	103,90	104,36	104,19	103,83	103,66	104,39	104,32	104,08	104,06	0,73
22	104,0	104,03	103,79	103,79	104,43	104,13	103,84	103,69	104,37	104,29	104,03	104,04	0,74
24	104,0	104,08	103,82	103,71	104,47	104,19	103,85	103,69	104,41	104,31	104,09	104,06	0,78
26	104,0	104,09	103,84	103,81	104,45	104,21	103,84	103,72	104,43	104,34	104,10	104,08	0,73
28	104,0	104,07	103,78	103,67	104,40	104,25	103,81	103,71	104,40	104,32	104,06	104,05	0,73
30	104,0	104,20	103,88	103,85	104,50	104,22	103,88	103,77	104,46	104,39	104,09	104,13	0,73
32	104,0	104,11	103,81	103,83	104,41	104,19	103,86	103,66	104,43	104,35	104,08	104,07	0,77
34	104,0	104,04	103,75	103,80	104,44	104,16	103,80	103,69	104,38	104,28	104,02	104,04	0,75
36	104,0	104,11	103,87	103,86	104,41	104,22	103,92	103,74	104,46	104,34	104,04	104,10	0,72
38	104,0	104,10	103,85	103,80	104,40	104,18	103,87	103,72	104,43	104,36	104,11	104,08	0,71
40	104,0	104,10	103,76	103,88	104,40	104,21	103,82	103,71	104,46	104,35	104,06	104,08	0,75
42	104,0	104,08	103,84	103,74	104,43	104,22	103,88	103,70	104,42	104,35	104,09	104,08	0,73
44	104,0	104,08	103,90	103,73	104,43	104,20	103,84	103,68	104,41	104,33	104,06	104,07	0,75
46	104,0	104,07	103,74	103,69	104,44	104,18	103,77	103,70	104,39	104,30	104,03	104,03	0,75
48	104,0	104,07	103,75	103,90	104,36	104,19	103,83	103,66	104,39	104,32	104,08	104,06	0,73
50	104,0	104,03	103,79	103,79	104,43	104,13	103,84	103,69	104,37	104,29	104,03	104,04	0,74
52	104,0	104,08	103,82	103,71	104,47	104,19	103,85	103,69	104,41	104,31	104,09	104,06	0,78
54	104,0	104,09	103,84	103,81	104,45	104,21	103,84	103,72	104,43	104,34	104,10	104,08	0,73
56	104,0	104,07	103,78	103,67	104,40	104,25	103,81	103,71	104,40	104,32	104,06	104,05	0,73
58	104,0	104,20	103,88	103,85	104,50	104,22	103,88	103,77	104,46	104,39	104,09	104,13	0,73
60	104,0	104,11	103,81	103,83	104,41	104,19	103,86	103,66	104,43	104,35	104,08	104,07	0,77
<b>T.PROM</b>	104,0	<b>104,10</b>	<b>103,81</b>	<b>103,79</b>	<b>104,43</b>	<b>104,20</b>	<b>103,85</b>	<b>103,71</b>	<b>104,42</b>	<b>104,34</b>	<b>104,06</b>	<b>104,07</b>	<b>0,74</b>
<b>T.MÁX.</b>	104,0	104,20	103,90	103,90	104,50	104,25	103,92	103,77	104,46	104,39	104,11	<b>104,13</b>	<b>0,78</b>
<b>T.MÍN.</b>	104,0	104,03	103,74	103,67	104,36	104,13	103,77	103,66	104,37	104,28	104,02	<b>104,03</b>	<b>0,71</b>
<b>DTT</b>	0,0	0,17	0,16	0,23	0,14	0,12	0,15	0,11	0,09	0,11	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,07</b>

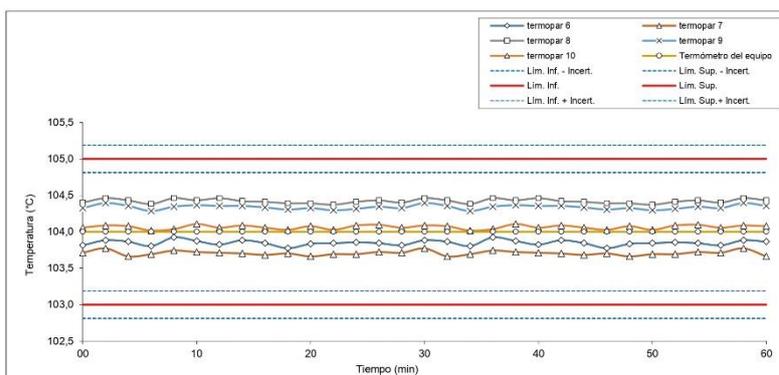
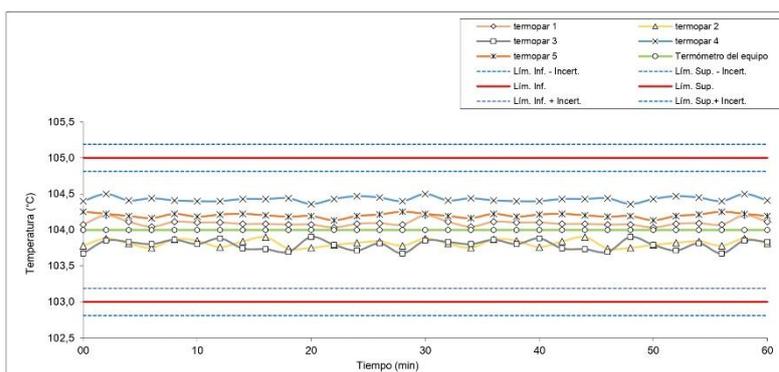
Parámetro	Valor (°C)	Incertidumbre Expandida (°C)
Máxima Temperatura medida	104,50	0,18
Mínima Temperatura medida	103,66	0,19
Desviación de Temperatura en el Tiempo	0,23	0,09
Desviación de Temperatura en el Espacio	0,72	0,15
Estabilidad medida (±)	0,11	0,05
Uniformidad	0,78	0,15

Durante la calibración y bajo las condiciones en las que esta ha sido realizada: el medio isotermo CUMPLE con los límites especificados de temperatura. La incertidumbre debida a la resolución del indicador es de 0,06 °C

Nomenclatura

- T. prom : Promedio de las indicaciones de todos los sensores de temperatura para un instante dado.
- T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub> : Diferencia entre la máxima y la mínima indicación de temperatura para un mismo instante de tiempo.
- T. PROM : Promedio de las indicaciones de un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MAX : Indicación máxima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MIN : Indicación mínima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- DTT : Desviación de temperatura en el Tiempo.

TEMPERATURA DE TRABAJO DE 104 °C ± 1 °C



8. Resultados de la calibración

Tiempo de calibración: 60 minutos

Posición del selector: 139,5 °C

Tiempo de calentamiento y estabilización: 90 minutos

Para la temperatura de 140 °C ± 2 °C

Tiempo (min)	Temp. Del equipo (°C)	MEDICIONES DE PATRONES (°C)										Temp. Promedio (°C)	T <sub>max</sub> -T <sub>min</sub> (°C)
		NIVEL SUPERIOR					NIVEL INFERIOR						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
00	139,5	139,96	140,35	139,68	140,07	140,81	139,89	139,99	140,74	140,18	139,47	140,11	1,34
02	139,5	139,91	140,30	139,59	140,12	140,82	139,87	139,94	140,67	140,16	139,41	140,08	1,41
04	139,5	139,91	140,33	139,63	140,03	140,80	139,98	140,02	140,72	140,15	139,50	140,11	1,30
06	139,5	139,99	140,42	139,60	140,18	140,93	139,92	140,05	140,75	140,21	139,49	140,15	1,44
08	139,5	139,98	140,31	139,67	140,14	140,87	139,91	140,06	140,76	140,22	139,54	140,14	1,33
10	139,5	139,89	140,44	139,73	140,20	140,69	139,86	140,05	140,68	140,12	139,39	140,10	1,30
12	139,5	139,98	140,52	139,87	140,27	140,85	139,98	140,16	140,80	140,24	139,48	140,21	1,37
14	139,5	139,98	140,43	139,82	140,35	140,79	139,92	140,08	140,77	140,20	139,45	140,18	1,34
16	139,5	139,98	140,45	139,75	140,19	140,75	139,87	140,00	140,71	140,18	139,46	140,13	1,29
18	139,5	139,91	140,35	139,63	140,21	140,63	139,82	139,88	140,61	140,11	139,30	140,04	1,33
20	139,5	139,87	140,33	139,60	140,06	140,75	139,74	139,91	140,62	140,06	139,30	140,02	1,45
22	139,5	140,00	140,41	139,71	140,20	140,83	139,90	140,08	140,75	140,19	139,46	140,15	1,37
24	139,5	139,99	140,43	139,75	140,19	140,87	139,94	140,08	140,79	140,25	139,53	140,18	1,34
26	139,5	139,96	140,35	139,68	140,07	140,81	139,89	139,99	140,74	140,18	139,47	140,11	1,34
28	139,5	139,91	140,30	139,59	140,12	140,82	139,87	139,94	140,67	140,16	139,41	140,08	1,41
30	139,5	139,91	140,33	139,63	140,03	140,80	139,98	140,02	140,72	140,15	139,50	140,11	1,30
32	139,5	139,99	140,42	139,60	140,18	140,93	139,92	140,05	140,75	140,21	139,49	140,15	1,44
34	139,5	139,98	140,31	139,67	140,14	140,87	139,91	140,06	140,76	140,22	139,54	140,14	1,33
36	139,5	139,89	140,44	139,73	140,20	140,69	139,86	140,05	140,68	140,12	139,39	140,10	1,30
38	139,5	139,98	140,52	139,87	140,27	140,85	139,98	140,16	140,80	140,24	139,48	140,21	1,37
40	139,5	139,98	140,43	139,82	140,35	140,79	139,92	140,08	140,77	140,20	139,45	140,18	1,34
42	139,5	139,98	140,45	139,75	140,19	140,75	139,87	140,00	140,71	140,18	139,46	140,13	1,29
44	139,5	139,91	140,35	139,63	140,21	140,63	139,82	139,88	140,61	140,11	139,30	140,04	1,33
46	139,5	139,87	140,33	139,60	140,06	140,75	139,74	139,91	140,62	140,06	139,30	140,02	1,45
48	139,5	140,00	140,41	139,71	140,20	140,83	139,90	140,08	140,75	140,19	139,46	140,15	1,37
50	139,5	139,99	140,43	139,75	140,19	140,87	139,94	140,08	140,79	140,25	139,53	140,18	1,34
52	139,5	139,96	140,35	139,68	140,07	140,81	139,89	139,99	140,74	140,18	139,47	140,11	1,34
54	139,5	139,91	140,30	139,59	140,12	140,82	139,87	139,94	140,67	140,16	139,41	140,08	1,41
56	139,5	139,91	140,33	139,63	140,03	140,80	139,98	140,02	140,72	140,15	139,50	140,11	1,30
58	139,5	139,99	140,42	139,60	140,18	140,93	139,92	140,05	140,75	140,21	139,49	140,15	1,44
60	139,5	139,98	140,31	139,67	140,14	140,87	139,91	140,06	140,76	140,22	139,54	140,14	1,33
<b>T.PROM</b>	139,5	<b>139,95</b>	<b>140,38</b>	<b>139,68</b>	<b>140,16</b>	<b>140,81</b>	<b>139,90</b>	<b>140,02</b>	<b>140,72</b>	<b>140,17</b>	<b>139,45</b>	<b>140,12</b>	<b>1,36</b>
<b>T.MÁX.</b>	139,5	140,00	140,52	139,87	140,35	140,93	139,98	140,16	140,80	140,25	139,54	<b>140,21</b>	<b>1,45</b>
<b>T.MÍN.</b>	139,5	139,87	140,30	139,59	140,03	140,63	139,74	139,88	140,61	140,06	139,30	<b>140,02</b>	<b>1,29</b>
<b>DTT</b>	0,0	0,13	0,22	0,28	0,32	0,30	0,24	0,28	0,18	0,19	0,24	0,19	<b>0,16</b>

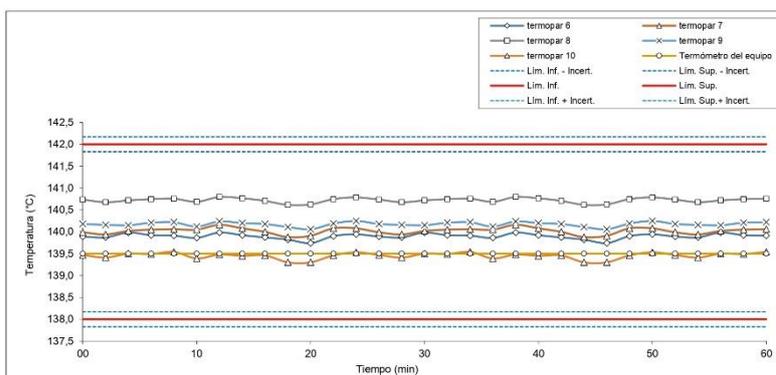
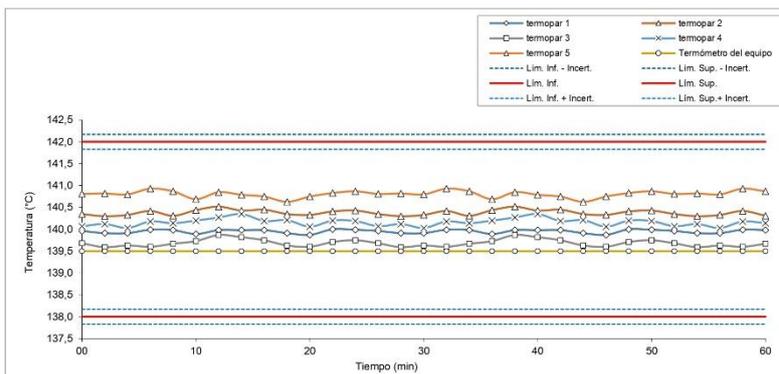
Parámetro	Valor (°C)	Incertidumbre Expandida (°C)
Máxima Temperatura medida	140,93	0,19
Mínima Temperatura medida	139,30	0,18
Desviación de Temperatura en el Tiempo	0,32	0,09
Desviación de Temperatura en el Espacio	1,36	0,15
Estabilidad medida (±)	0,16	0,05
Uniformidad	1,45	0,15

Durante la calibración y bajo las condiciones en las que esta ha sido realizada: el medio isoterma CUMPLE con los límites especificados de temperatura. La incertidumbre debida a la resolución del indicador es de 0,06 °C

Nomenclatura

- T. prom : Promedio de las indicaciones de todos los sensores de temperatura para un instante dado.
- T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub> : Diferencia entre la máxima y la mínima indicación de temperatura para un mismo instante de tiempo.
- T. PROM : Promedio de las indicaciones de un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MAX : Indicación máxima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MIN : Indicación mínima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- DTT : Desviación de temperatura en el Tiempo.

TEMPERATURA DE TRABAJO DE 140 °C ± 2 °C



8. Resultados de la calibración

Tiempo de calibración: 60 minutos

Posición del selector: 179,5 °C

Tiempo de calentamiento y estabilización: 90 minutos

Para la temperatura de 180 °C ± 2 °C

Tiempo (min)	Temp. Del equipo (°C)	MEDICIONES DE PATRONES (°C)										Temp. Promedio (°C)	T <sub>max</sub> -T <sub>min</sub> (°C)
		NIVEL SUPERIOR					NIVEL INFERIOR						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
00	179,5	178,79	179,76	180,60	179,09	180,74	178,95	180,31	181,04	180,00	180,09	179,94	2,25
02	179,5	178,80	179,72	180,62	179,07	180,76	178,92	180,35	181,08	180,07	180,06	179,95	2,28
04	179,5	178,80	179,62	180,89	179,11	180,71	179,03	180,35	181,08	180,13	180,11	179,98	2,28
06	179,5	178,73	179,82	180,86	179,15	180,81	179,05	180,43	181,09	180,14	180,09	180,02	2,36
08	179,5	178,81	179,98	180,82	179,30	180,77	179,09	180,50	181,15	180,22	180,26	180,09	2,34
10	179,5	178,83	179,82	180,96	179,07	180,73	179,11	180,36	181,14	180,16	180,12	180,03	2,31
12	179,5	178,81	179,86	180,99	179,14	180,71	179,02	180,29	180,97	180,08	180,10	180,00	2,18
14	179,5	178,84	179,83	180,86	179,26	180,72	179,00	180,36	181,05	180,00	180,21	180,01	2,21
16	179,5	178,92	179,94	180,84	179,10	180,67	178,99	180,38	181,07	180,11	180,12	180,01	2,16
18	179,5	178,87	180,02	181,00	179,27	180,57	179,00	180,40	181,07	180,04	180,09	180,03	2,21
20	179,5	179,04	180,06	181,23	179,37	180,62	179,06	180,34	181,08	180,13	180,17	180,11	2,20
22	179,5	178,87	179,95	180,93	179,26	180,51	178,81	180,25	181,00	180,04	180,08	179,97	2,19
24	179,5	178,85	179,87	181,02	179,28	180,50	178,85	180,21	180,92	179,98	180,08	179,96	2,17
26	179,5	178,93	179,96	181,12	179,24	180,48	178,94	180,28	180,97	180,04	180,10	180,01	2,20
28	179,5	178,84	179,70	180,91	179,09	180,76	179,10	180,39	181,08	180,08	180,17	180,01	2,24
30	179,5	178,85	179,92	180,90	179,13	180,75	179,10	180,44	181,11	180,11	180,18	180,05	2,26
32	179,5	178,83	179,81	180,61	179,18	180,80	179,00	180,41	181,11	180,07	180,19	180,00	2,28
34	179,5	178,79	179,76	180,60	179,09	180,74	178,95	180,31	181,04	180,00	180,09	179,94	2,25
36	179,5	178,80	179,72	180,62	179,07	180,76	178,92	180,35	181,08	180,07	180,06	179,95	2,28
38	179,5	178,80	179,62	180,89	179,11	180,71	179,03	180,35	181,08	180,13	180,11	179,98	2,28
40	179,5	178,73	179,82	180,86	179,15	180,81	179,05	180,43	181,09	180,14	180,09	180,02	2,36
42	179,5	178,81	179,98	180,82	179,30	180,77	179,09	180,50	181,15	180,22	180,26	180,09	2,34
44	179,5	178,83	179,82	180,96	179,07	180,73	179,11	180,36	181,14	180,16	180,12	180,03	2,31
46	179,5	178,81	179,86	180,99	179,14	180,71	179,02	180,29	180,97	180,08	180,10	180,00	2,18
48	179,5	178,84	179,83	180,86	179,26	180,72	179,00	180,36	181,05	180,00	180,21	180,01	2,21
50	179,5	178,92	179,94	180,84	179,10	180,67	178,99	180,38	181,07	180,11	180,12	180,01	2,16
52	179,5	178,87	180,02	181,00	179,27	180,57	179,00	180,40	181,07	180,04	180,09	180,03	2,21
54	179,5	179,04	180,06	181,23	179,37	180,62	179,06	180,34	181,08	180,13	180,17	180,11	2,20
56	179,5	178,87	179,95	180,93	179,26	180,51	178,81	180,25	181,00	180,04	180,08	179,97	2,19
58	179,5	178,85	179,87	181,02	179,28	180,50	178,85	180,21	180,92	179,98	180,08	179,96	2,17
60	179,5	178,93	179,96	181,12	179,24	180,48	178,94	180,28	180,97	180,04	180,10	180,01	2,20
<b>T.PROM</b>	179,5	178,85	179,87	180,90	179,18	180,68	179,00	180,35	181,06	180,08	180,12	<b>180,01</b>	<b>2,24</b>
<b>T.MÁX.</b>	179,5	179,04	180,06	181,23	179,37	180,81	179,11	180,50	181,15	180,22	180,26	<b>180,11</b>	<b>2,36</b>
<b>T.MÍN.</b>	179,5	178,73	179,62	180,60	179,07	180,48	178,81	180,21	180,92	179,98	180,06	<b>179,94</b>	<b>2,16</b>
<b>DTT</b>	0,0	0,30	0,44	0,64	0,29	0,33	0,29	0,29	0,23	0,24	0,20	0,17	<b>0,20</b>

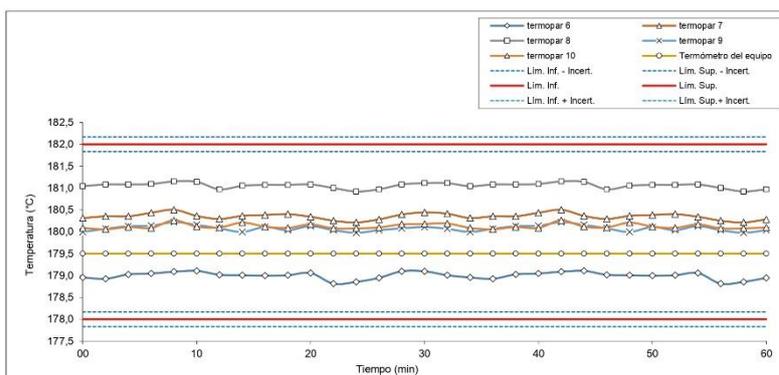
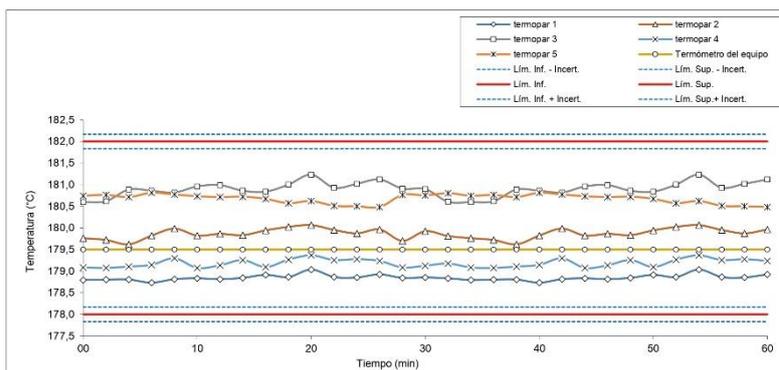
Parámetro	Valor (°C)	Incertidumbre Expandida (°C)
Máxima Temperatura medida	181,23	0,18
Mínima Temperatura medida	178,73	0,17
Desviación de Temperatura en el Tiempo	0,64	0,09
Desviación de Temperatura en el Espacio	2,21	0,15
Estabilidad medida (±)	0,32	0,05
Uniformidad	2,36	0,15

Durante la calibración y bajo las condiciones en las que esta ha sido realizada: el medio isoterma CUMPLE con los límites especificados de temperatura. La incertidumbre debida a la resolución del indicador es de 0,06 °C

Nomenclatura

- T. prom : Promedio de las indicaciones de todos los sensores de temperatura para un instante dado.
- T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub> : Diferencia entre la máxima y la mínima indicación de temperatura para un mismo instante de tiempo.
- T. PROM : Promedio de las indicaciones de un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MAX : Indicación máxima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MIN : Indicación mínima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- DTT : Desviación de temperatura en el Tiempo.

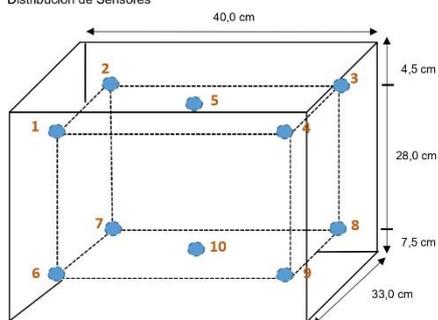
TEMPERATURA DE TRABAJO DE 180 °C ± 2 °C



Certificado de calibración N° LTCA-0223-2023

Página 8 de 8

Distribución de Sensores



Fotografía de distribución de carga



Los sensores 5 y 10 están ubicados en el centro de sus respectivos niveles.  
Los sensores del 1 al 4 y del 6 al 9 se colocaron a 5 cm de las paredes laterales, y también a 5 cm del fondo y frente del medio isotermo.  
Los sensores del 1 al 5 están ubicados a 35,5 cm por encima de la base del medio isotermo.  
Los sensores del 6 al 10 están ubicados a 7,5 cm por encima de la base del medio isotermo.

9. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación CALBRADO con N° EM-00486.
- Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
- La incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura  $k = 2$  que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %.

FIN DEL DOCUMENTO

## c. Mufla



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO  
POR EL ORGANISMO A2LA CON CERTIFICADO #6032.01  
SEGÚN NTP-ISO/IEC 17025:2017



### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LTCA-0068-2021

Página 1 de 6

Expediente: 00022

Fecha de emisión: 2022-02-17

1. **Solicitante :** SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.  
**Dirección :** Calle 22 Vipol Naranjal MZ. E Lote 07, San Martín de Porras-Lima

2. **Instrumento calibrado :** MUFLA  
 Marca : KYNTEL  
 Modelo : SX2.4-10  
 N° de serie : 150483  
 Código : EL-LAB-85  
**Indicador :** Digital  
 Alcance del indicador : 0 °C - 1000 °C  
 Resolución del indicador : 0,1 °C  
**Selector :** Analógico  
 Alcance del selector : 0 °C - 1000 °C  
 Resolución del selector : 0,1 °C  
 Carga : 2 crisoles  
 Porcentaje de carga : 20 %  
 Tipo de ventilación : Natural  
 Ubicación : Laboratorio  
 Temperaturas de Trabajo : (550 °C; 990 °C) ± 20 °C

3. **Lugar de calibración :** Instalaciones de SLAB S.A.C.

4. **Fecha de calibración :** 2021-02-15

5. **Método de calibración**

La calibración se realizó por comparación directa siguiendo el PC-018 "Procedimiento para la calibración o caracterización de medios isotermos con aire como medio termostático". Segunda Edición. 2009 INDECOPI/SNM (Validado).

6. **Trazabilidad**

Los resultados de la calibración realizada tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL - DM, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) y el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP)

Código	Descripción	Certificado de calibración
PTT-006	Termómetro Multicanal con incertidumbre "U" de 2,5 °C a 3,7 °C	TE-2300-2020

7. **Condiciones de calibración**

	Inicio	Final		Inicio	Final
Temperatura ambiental	26,0 °C	26,9 °C	Voltaje	218 V	221 V
Humedad relativa	51,0 %	56,5 %			

Los resultados presentados corresponden sólo al ítem calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.

El certificado de calibración es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia. Sin perjuicio de lo señalado, dicho uso puede configurar por sus efectos una infracción a las normas de protección al consumidor y las que regulan la libre competencia.

Al usuario le corresponde disponer en su momento la ejecución de una nueva calibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

SLAB S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente, excepto con autorización expresa por escrito de SLAB S.A.C.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del responsable técnico de SLAB S.A.C.

Oscar F. Vivanco Valerio  
Jefe de Laboratorio de Metrología

8. Resultados de la calibración

Tiempo de calibración del equipo = 60 minutos Temperatura de seteo = 550 °C  
 Tiempo de precalentamiento y estabilización = 120 minutos

Para la temperatura de 550 °C ± 20 °C

Tiempo (min)	Temp. de la MUFLA (°C)	MEDICIONES DE PATRONES (°C)										Temp. Promedio (°C)	T <sub>max</sub> -T <sub>min</sub> (°C)
		NIVEL SUPERIOR					NIVEL INFERIOR						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
00	550.0	557.52	542.29	555.33	550.22	558.85	554.56	550.90	552.03	551.55	549.05	552.23	16.56
02	550.0	559.93	544.70	557.73	552.63	561.16	556.97	553.31	554.34	553.85	551.45	554.61	16.46
04	550.0	561.24	546.31	559.14	554.03	562.46	558.17	554.81	555.94	555.35	552.85	556.03	16.16
06	550.0	561.74	547.21	559.64	554.73	563.07	558.37	555.62	556.64	556.15	553.55	556.67	15.86
08	550.0	561.74	547.51	559.54	554.73	562.97	557.97	555.82	556.94	556.45	553.55	556.72	15.45
10	550.0	561.24	547.31	559.14	554.43	562.56	557.17	555.52	556.74	556.35	553.25	556.37	15.25
12	550.0	560.44	546.81	558.34	553.73	561.86	556.16	555.01	556.24	555.95	552.55	555.71	15.05
14	550.0	559.53	546.11	557.33	552.93	560.96	554.96	554.21	555.54	555.35	551.75	554.87	14.85
16	550.0	558.33	545.10	556.23	551.93	559.85	553.66	553.31	554.64	554.55	550.75	553.83	14.75
18	550.0	557.22	544.20	555.13	550.82	558.85	552.45	552.30	553.73	553.65	549.65	552.80	14.65
20	550.0	555.92	543.10	554.03	549.72	557.75	551.15	551.20	552.73	552.65	548.55	551.68	14.65
22	550.0	554.81	541.99	552.83	548.62	556.64	549.85	550.20	551.63	551.65	547.45	550.57	14.65
54	550.0	557.22	544.20	555.13	550.82	558.85	552.45	552.30	553.73	553.65	549.65	552.80	14.65
56	550.0	555.92	543.10	554.03	549.72	557.75	551.15	551.20	552.73	552.65	548.55	551.68	14.65
58	550.0	554.91	541.99	552.53	548.72	556.64	550.05	550.09	551.53	551.35	547.55	550.54	14.65
60	550.0	553.61	540.89	551.32	547.52	555.44	548.64	548.99	550.52	550.35	546.34	549.36	14.55
62	550.0	552.40	539.78	550.12	546.42	554.34	547.44	547.79	549.32	549.25	545.24	548.21	14.55
64	550.0	551.10	538.58	549.02	545.22	553.23	546.13	546.68	548.31	548.35	544.04	547.07	14.65
66	550.0	549.89	537.48	547.92	544.01	552.13	544.83	545.48	547.21	547.15	542.84	545.89	14.65
68	550.0	548.79	536.37	546.82	543.01	551.02	543.73	544.37	546.11	546.16	541.84	544.82	14.65
70	550.0	548.59	535.77	546.62	542.61	550.72	543.73	544.07	545.70	545.76	541.44	544.50	14.95
72	550.0	550.50	536.77	548.42	544.11	552.33	546.33	545.18	546.71	546.55	542.94	545.98	15.55
74	550.0	554.11	539.38	551.93	547.12	556.54	550.75	547.99	549.22	548.85	545.94	549.08	16.16
76	550.0	556.12	541.29	554.33	549.02	557.55	552.85	549.89	551.12	550.85	547.85	551.09	16.26
78	550.0	559.33	544.10	557.43	551.93	560.56	556.26	552.70	553.83	553.45	550.75	554.03	16.46
80	550.0	561.34	546.21	559.54	554.03	562.56	558.37	554.91	556.94	555.55	552.85	556.13	16.36
82	550.0	562.54	547.61	560.74	555.23	563.67	559.27	556.22	557.35	556.94	554.05	557.36	16.06
84	550.0	562.24	547.51	559.94	554.73	562.97	557.97	555.82	556.94	556.45	553.55	556.77	15.45
86	550.0	560.94	547.31	559.14	554.43	562.56	557.17	555.52	556.74	556.35	553.25	556.34	15.25
88	550.0	560.44	546.81	558.34	553.73	561.86	556.16	555.01	556.24	555.95	552.55	555.71	15.05
90	550.0	559.53	546.11	557.33	552.93	560.96	554.96	554.21	555.54	555.35	551.75	554.87	14.85
T PROM	550.0	557.07	543.35	554.99	550.45	558.83	552.89	551.63	552.97	552.72	549.27	552.40	15.28
T MAX	550.0	562.54	547.61	560.74	555.23	563.67	559.27	556.22	557.35	556.94	554.05	557.36	16.56
T MIN	550.0	548.59	535.77	546.62	542.61	550.72	543.73	544.07	545.70	545.76	541.44	544.50	14.55
DTT	0.0	13.96	11.84	14.12	12.62	12.95	15.55	12.15	11.64	11.19	12.61	12.86	2.01

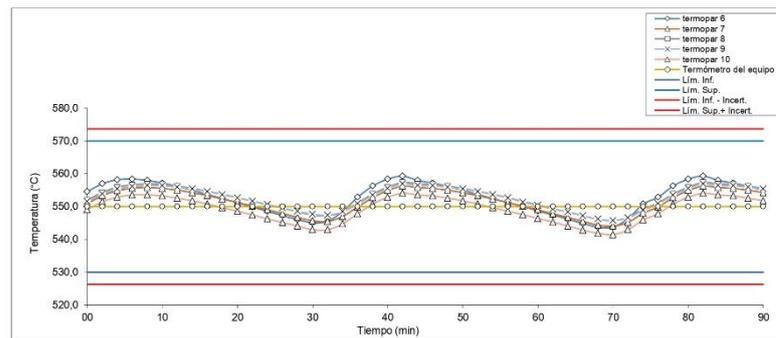
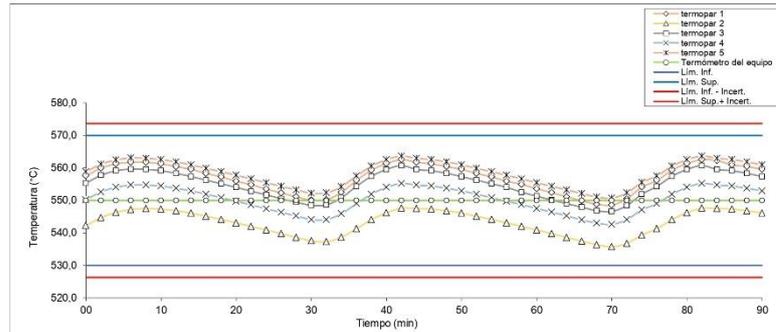
Parámetro	Valor (°C)	Incertidumbre Expandida (°C)
Máxima Temperatura medida	563.7	3.71
Mínima Temperatura medida	535.8	3.70
Desviación de Temperatura en el Tiempo	15.5	0.08
Desviación de Temperatura en el Espacio	15.3	0.17
Estabilidad medida (s)	7.8	0.04
Uniformidad	16.6	0.36

Durante la calibración y bajo las condiciones en las que esta ha sido realizada: el medio isoterma CUMPLE con los límites especificados de temperatura. La incertidumbre debida a la resolución del indicador es de 0,06 °C

Nomenclatura

- T. prom : Promedio de las indicaciones de todos los sensores de temperatura para un instante dado.
- T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub> : Diferencia entre la máxima y la mínima indicación de temperatura para un mismo instante de tiempo.
- T. PROM : Promedio de las indicaciones de un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MAX : Indicación máxima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MIN : Indicación mínima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- DTT : Desviación de temperatura en el Tiempo.

TEMPERATURA DE TRABAJO DE 550 °C ± 20 °C



Certificado de calibración N° LTCA-0068-2021  
Página 4 de 6

Tiempo de calibración del equipo = 60 minutos Temperatura de seteo = 990 °C  
Tiempo de precalentamiento y estabilización = 120 minutos

Para la temperatura de 990 °C ± 20 °C

Tiempo (min)	Temp. de la MUFLA (°C)	MEDICIONES DE PATRONES (°C)										Temp. Promedio (°C)	T <sub>max</sub> -T <sub>min</sub> (°C)
		NIVEL SUPERIOR					NIVEL INFERIOR						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
00	990.0	988.7	987.5	987.4	988.6	988.7	988.8	987.5	986.7	989.5	988.0	988.14	2.76
02	990.0	991.6	990.2	990.5	991.5	991.9	991.7	990.6	989.8	992.3	991.2	991.14	2.48
04	990.0	993.5	991.9	992.3	993.3	993.8	993.5	992.6	991.7	994.0	993.2	992.99	2.29
06	990.0	993.9	992.3	992.7	993.7	994.2	993.9	993.0	992.1	994.4	993.6	993.39	2.29
08	990.0	993.9	992.4	992.7	993.8	994.2	994.0	993.0	992.1	994.5	993.6	993.43	2.39
10	990.0	991.4	990.1	990.3	991.3	991.6	991.6	990.4	989.6	992.2	990.9	990.95	2.58
12	990.0	988.1	987.1	986.8	988.1	988.1	988.3	986.8	986.1	989.0	987.3	987.57	2.86
14	990.0	984.4	983.6	983.0	984.4	984.2	984.6	982.9	982.3	985.5	983.4	983.84	3.24
16	990.0	981.1	980.5	979.5	981.2	980.7	981.3	979.3	978.8	982.3	979.8	980.46	3.53
18	990.0	978.6	978.2	977.1	978.7	978.1	978.9	976.7	976.3	980.0	977.1	977.98	3.71
20	990.0	977.4	977.1	975.9	977.6	976.9	977.8	975.5	975.1	978.9	975.9	976.83	3.81
22	990.0	977.8	977.5	976.3	978.0	977.3	978.2	975.9	975.5	979.3	976.3	977.23	3.81
24	990.0	979.7	979.2	978.1	979.8	979.2	980.0	977.9	977.4	981.0	978.3	979.07	3.62
26	990.0	981.5	980.8	980.0	981.6	981.2	981.7	979.8	979.3	982.6	980.3	980.88	3.33
28	990.0	985.1	984.2	983.8	985.1	985.0	985.3	983.7	983.1	986.1	984.2	984.56	3.06
30	990.0	988.7	987.5	987.4	988.6	988.7	988.8	987.5	986.7	989.5	988.0	988.14	2.76
32	990.0	991.7	990.2	990.5	991.5	991.9	991.7	990.6	989.8	992.3	991.2	991.15	2.48
34	990.0	993.5	991.9	992.3	993.3	993.8	993.5	992.6	991.7	994.0	993.2	992.99	2.29
36	990.0	993.9	992.3	992.7	993.7	994.2	993.9	993.0	992.1	994.4	993.6	993.39	2.29
38	990.0	992.7	991.2	991.5	992.6	993.0	992.8	991.8	990.9	993.3	992.4	992.24	2.38
40	990.0	990.3	988.9	989.0	990.2	990.4	990.3	989.2	988.3	991.0	989.7	989.73	2.67
42	990.0	986.9	985.9	985.5	986.9	986.9	987.0	985.6	984.8	987.8	986.1	986.35	2.95
44	990.0	984.4	983.6	983.0	984.4	984.2	984.6	982.9	982.3	985.5	983.3	983.83	3.24
46	990.0	981.0	980.5	979.5	981.2	980.7	981.3	979.3	978.8	982.3	979.7	980.44	3.53
48	990.0	978.5	978.1	977.1	978.7	978.1	978.9	976.7	976.3	980.0	977.1	977.96	3.71
50	990.0	977.4	977.1	975.9	977.6	976.9	977.8	975.5	975.1	978.9	975.9	976.83	3.81
52	990.0	977.8	977.5	976.3	978.0	977.3	978.2	975.9	975.5	979.3	976.3	977.23	3.81
54	990.0	979.7	979.2	978.1	979.8	979.3	980.0	977.9	977.4	981.0	978.3	979.08	3.62
56	990.0	981.5	980.8	980.0	981.6	981.2	981.7	979.8	979.3	982.7	980.3	980.90	3.43
58	990.0	985.1	984.2	983.8	985.1	985.0	985.3	983.7	983.1	986.1	984.2	984.56	3.06
60	990.0	988.7	987.6	987.4	988.7	988.8	988.8	987.5	986.7	989.5	988.0	988.14	2.76
62	990.0	991.7	990.2	990.5	991.5	991.9	991.7	990.6	989.8	992.3	991.2	991.15	2.48
64	990.0	993.5	991.9	992.3	993.3	993.8	993.5	992.6	991.7	994.0	993.2	992.99	2.29
66	990.0	993.9	992.3	992.7	993.7	994.2	993.9	993.0	992.1	994.4	993.6	993.39	2.29
68	990.0	992.7	991.2	991.5	992.6	993.0	992.8	991.8	990.9	993.3	992.4	992.24	2.38
70	990.0	984.4	983.6	983.0	984.4	984.2	984.6	982.9	982.3	985.5	983.3	983.83	3.24
72	990.0	981.0	980.5	979.5	981.2	980.7	981.3	979.3	978.8	982.3	979.7	980.44	3.53
74	990.0	978.5	978.1	977.1	978.7	978.1	978.9	976.7	976.3	980.0	977.1	977.96	3.71
76	990.0	977.4	977.1	975.9	977.6	976.9	977.8	975.5	975.1	978.9	975.9	976.83	3.81
78	990.0	977.8	977.5	976.3	978.0	977.3	978.2	975.9	975.5	979.3	976.3	977.23	3.81
80	990.0	979.7	979.2	978.1	979.8	979.3	980.0	977.9	977.4	981.0	978.3	979.08	3.62
82	990.0	981.5	980.8	980.0	981.6	981.2	981.7	979.8	979.3	982.7	980.3	980.90	3.43
84	990.0	985.1	984.2	983.8	985.1	985.0	985.3	983.7	983.1	986.1	984.2	984.56	3.06
86	990.0	988.7	987.5	987.4	988.6	988.7	988.8	987.5	986.7	989.5	988.0	988.14	2.76
88	990.0	991.7	990.2	990.5	991.5	991.9	991.7	990.6	989.8	992.3	991.2	991.15	2.48
90	990.0	993.5	991.9	992.3	993.3	993.8	993.5	992.6	991.7	994.0	993.2	992.99	2.29
<b>T.PROM</b>	990.0	<b>985.48</b>	<b>984.68</b>	<b>984.22</b>	<b>985.59</b>	<b>985.47</b>	<b>985.77</b>	<b>984.17</b>	<b>983.51</b>	<b>986.57</b>	<b>984.71</b>	<b>985.02</b>	<b>3.07</b>
<b>T.MAX.</b>	990.0	993.91	992.42	992.73	993.81	994.20	994.00	993.00	992.11	994.50	993.60	<b>993.43</b>	<b>3.81</b>
<b>T.MIN.</b>	990.0	977.44	977.14	975.87	977.63	976.92	977.84	975.50	975.09	978.90	975.94	<b>976.83</b>	<b>2.29</b>
<b>DTT</b>	0.0	16.47	15.27	16.86	16.18	17.28	16.16	17.50	17.02	15.60	17.66	<b>16.60</b>	<b>1.53</b>

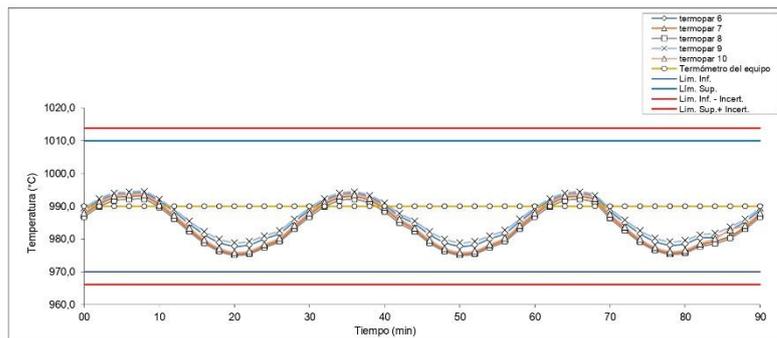
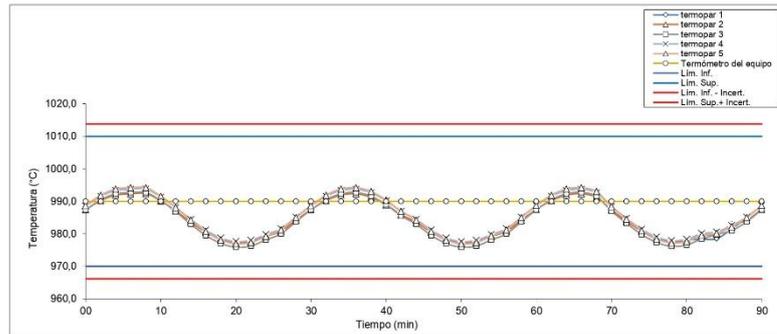
Parámetro	Valor (°C)	Incertidumbre Expandida (°C)
Máxima Temperatura medida	994.5	3.82
Mínima Temperatura medida	975.1	3.86
Desviación de Temperatura en el Tiempo	17.66	0.08
Desviación de Temperatura en el Espacio	3.1	0.24
Estabilidad medida (s)	8.83	0.04
Uniformidad	3.8	0.26

Durante la calibración y bajo las condiciones en las que esta ha sido realizada: el medio isotermo CUMPLE con los límites especificados de temperatura. La incertidumbre debida a la resolución del indicador es de 0.06 °C

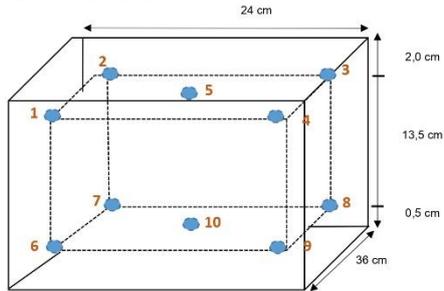
**Nomenclatura**

- T. prom : Promedio de las indicaciones de todos los sensores de temperatura para un instante dado.
- T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub> : Diferencia entre la máxima y la mínima indicación de temperatura para un mismo instante de tiempo.
- T. PROM : Promedio de las indicaciones de un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MAX : Indicación máxima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- T. MIN : Indicación mínima para un sensor de temperatura durante el tiempo de calibración.
- DTT : Desviación de temperatura en el Tiempo.

TEMPERATURA DE TRABAJO DE 990 °C ± 20 °C



Distribución de Sensores



Los sensores 5 y 10 están ubicados en el centro de sus respectivos niveles.  
Los sensores del 1 al 4 y del 6 al 9 se colocaron a 2,5 cm de las paredes laterales y a 4 cm del fondo y frente del medio isoterma.  
Los sensores del 1 al 5 están ubicados a 14 cm por encima de la base del medio isoterma.  
Los sensores del 6 al 10 están ubicados a 0,5 cm por encima de la base del medio isoterma.

Fotografía de distribución de carga



**9. Observaciones**

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO".
- Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
- La incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura  $k = 2$  que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %.

## d. Analizador de carbono y nitrógeno



### L & L SERVICIOS TÉCNICOS S.A.C.

Calle José Olaya N° 327, Santa Anita  
Celular: 966633676 / Teléfono: 01-3620075

Correo: [administración@lvserviciostecnicos.com](mailto:administración@lvserviciostecnicos.com), [jorgelazo@lvserviciostecnicos.com](mailto:jorgelazo@lvserviciostecnicos.com)

## INFORME DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y VERIFICACION OPERACIONAL DE ANALIZADOR DE CARBONO Y NITROGENO - MODELO TRUSPEC CN

CLIENTE:	SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.
CONTACTO:	Stiven Julca – Responsable General de Laboratorio
FECHA:	18-07-22
N° DE REPORTE:	071-0522
INSTRUMENTO:	(EL-AGR-037)
N° SERIE:	3157
SOFTWARE:	2.72
NRO. OC:	2027
ING. DE SERVICIO	Jorge Lazo Q.

### 1. ACTIVIDADES:

- Mantenimiento preventivo de analizador.
- Verificación operacional de analizador.

### 2. INTERVENCIÓN TÉCNICA:

1. Eliminación de fugas de oxígeno en circuito analítico.
2. Eliminación de fugas de helio en circuito analítico.
3. Limpieza de la válvula dosificadora.
4. Limpieza de celda de detección TC.
5. Limpieza de balastro.
6. Limpieza, lubricación y regulación del mecanismo del cabezal de carga automática de muestras.
7. Verificación del método de análisis para la determinación de nitrógeno en Suelos y Fertilizantes/Vegetales.
8. Calibración analítica del instrumento usando EDTA.
9. Pruebas operativas del analizador.

### 3. VERIFICACIÓN OPERATIVA:

#### 3.1 Parámetros de operación: No presenta alarmas

Parámetro	Valor Nominal	Rango	Valor registrado	Unidad
CO2 Cell	4.00	1.5 – 4.8	2.77	V
Nitrogen	90.00	0 – 1.5	0.18	V
Bridge volts	N/A	5 - 11	9.18	V
Ballast pressure	N/A	720 - 1300	765.20	mmHg
Combustion flow	N/A	0 - 6	0.2	lpm
Pneumatic incoming pressure	40.00	38 - 42	40	psi
Oxygen incoming pressure	35.00	33 - 37	35.00	psi
Combustion pressure	N/A	0 - 20	5.00	psi
Combustion furnace temp.	950.00	900 – 1,050	950.00	°C

1



## L & L SERVICIOS TÉCNICOS S.A.C.

Calle José Olaya N° 327, Santa Anita  
 Celular: 966633676 / Teléfono: 01-3620075

Correo: [administración@llyserviciostecnicos.com](mailto:administración@llyserviciostecnicos.com), [jorgelazo@llyserviciostecnicos.com](mailto:jorgelazo@llyserviciostecnicos.com)

Afterburner temp.	850.00	T° amb. – 1,050	850.00	°C
Cabinet temp.	N/A	T° amb. – 50	28.00	°C
TE Cooler temp.	N/A	2 - 10	5.00	°C
Oven temp.	N/A	45 - 55	50.00	°C
Ballast temp.	N/A	40 - 55	40.00	°C
Reduction tube	N/A	690 - 710	695.00	°C
Ballast oven temp.	N/A	40 - 55	40.00	°C

\*N/A = No aplica

### 3.2 Verificación de fugas:

Prueba de fugas	Rango nominal	Valor registrado	Resultado
Oxígeno	< 5 mmHg	0.591 mmHg	Aprobado
Helio	< 5 mmHg	0.565 mmHg	Aprobado

### 4. CONCLUSIONES:

- Instrumento queda operativo y calibrado.
- Se verificó la calibración analítica del método "SUELOS" con el estándar certificado EDTA n/p: 502-896 Lot. 1002 (03 repeticiones) con concentración de nitrógeno 9.57% +/- 0.04 obteniendo un valor promedio de 9.57% y una desviación estándar de 0.009 (RSD=0.098).
- Se verificó la calibración analítica del método "FERTILIZANTES Y VEGETALES" con el estándar certificado EDTA n/p: 502-896 Lot. 1002 (03 repeticiones) con concentración de nitrógeno 9.57% +/- 0.04 obteniendo un valor promedio de 9.57% y una desviación estándar de 0.009 (RSD=0.094).
- Los valores de los parámetros de operación registrados se encuentran dentro del rango nominal de trabajo.
- Las válvulas solenoides se encuentran operando correctamente.
- Los interruptores se encuentran operando correctamente.
- Las pruebas de fugas de oxígeno y helio fueron aprobadas.

### 5. RECOMENDACIONES:

- Se recomienda realizar el mantenimiento preventivo del analizador con una frecuencia de 06 o 12 meses.

### 6. NRO. ANALISIS: 320

### 7. REPUESTOS CAMBIADOS Y REQUERIDOS:

Descripción	N° Parte	Cantidad	TIPO



**8. REGISTROS:**

Fig. 1: Parámetros de operación (Ambient)

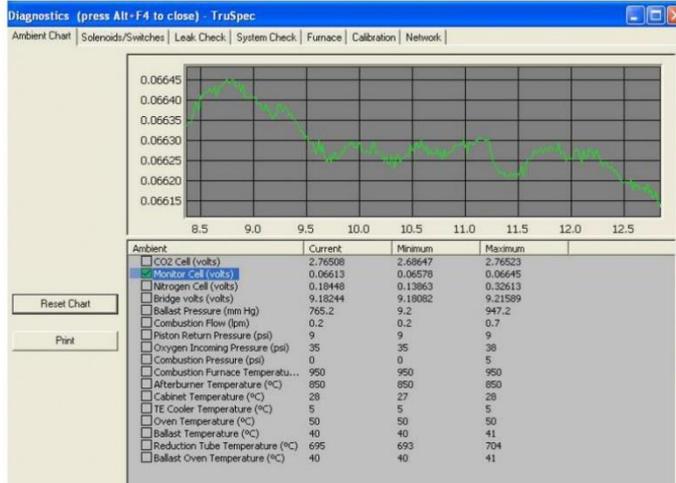
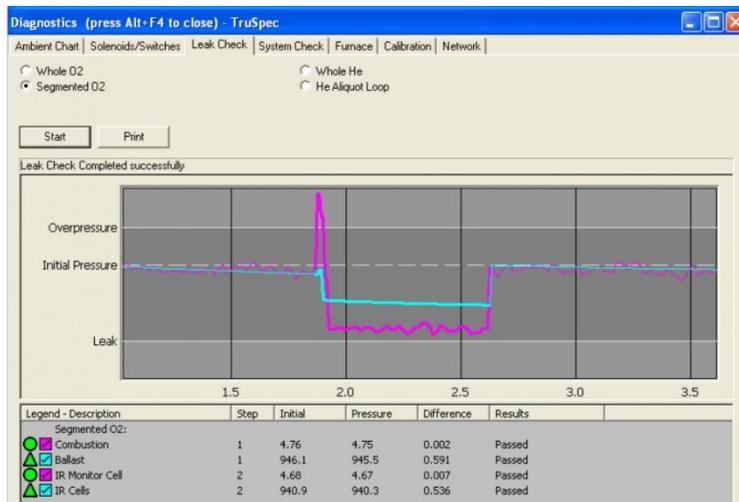


Fig. 2: Prueba de fugas oxigeno (Leak check)





## L & L SERVICIOS TÉCNICOS S.A.C.

Calle José Olaya N° 327, Santa Anita  
 Celular: 966633676 / Teléfono: 01-3620075

Correo: [administración@lvserviciostecnicos.com](mailto:administración@lvserviciostecnicos.com), [jorgelazo@lvserviciostecnicos.com](mailto:jorgelazo@lvserviciostecnicos.com)

Fig. 3: Prueba de fugas helio (Leak check)

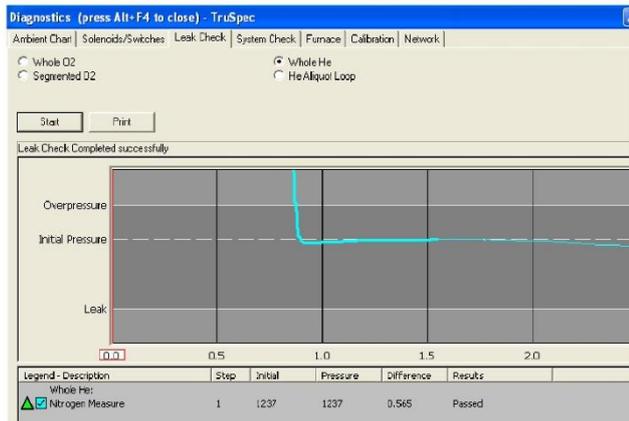
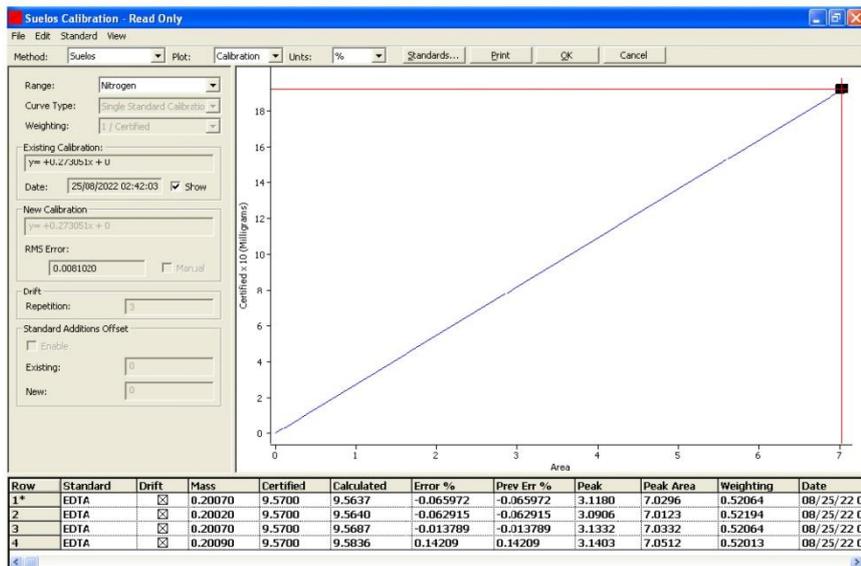


Fig. 4: Verificación de calibración analítica



4

### 9. CONFORMIDAD:

 <b>L &amp; L SERVICIOS TÉCNICOS S.A.C.</b> Jorge Eduardo Lazo Quispe Departamento Técnico	<b>S. Julca</b>
<b>Soporte Técnico</b>	<b>Cliente</b>
Nombre: Jorge Lazo	Nombre: Stiven Julca
Dpto. Técnico L & L	Responsable General de Laboratorio

e. Espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente

	<b>CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO ICP-OES AVIO 550</b>	CÓDIGO : FGPV_CVR_ICPAVIO550M REVISIÓN : 00 APROBADO : JPV ELABORADO: APV FECHA : 23/04/21
---	--	--

**ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN ÓPTICA CON PLASMA ACOPLADO  
INDUCTIVAMENTE**  
PERKIN ELMER MODELO ICP-OES AVIO 550 MAX

Compañía: SISTEMA DE SERVICIOS Y ANALISIS QUIMICOS S.A.C.  
Dirección: CALLE 22 MZ"E" LOTE"7" URB.VIPOL  
DE NARANJAL SAN MARTIN DE PORRES  
Área: LABORATORIO  
Responsable: Ing. ANTHONY VARGAS  
Teléfono: 921979021  
Código del Cliente: -----  
Fecha de Evaluación: MAYO 19 DEL 2023  
Próxima Certificación  
Periodo recomendado: 12-MESES  
Fecha Sugerida: MAYO 2024  
No. de Certificado: CM 00137- 2023  
Fecha Ultimo Certificado: -----  
Teléfono de Consultas: 2015800 / 444 9993

	<b>CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO ICP-OES AVIO 550</b>	<b>CÓDIGO : FGPV_CVR_ICPAVIO550M</b>
		<b>REVISIÓN : 00</b> <b>APROBADO : JPV</b> <b>ELABORADO: APV</b> <b>FECHA : 23/04/21</b>

<b>CONFIGURACIÓN EVALUADA:</b>		<b>ACCESORIOS / COMPONENTES, NO INCLUIDOS en la descripción del modelo pero utilizado en la prueba.</b>	
<b>Modelo</b>	<b>No. Serie</b>	<b>Modelo</b>	<b>No. Serie</b>
AVIO 550 MAX	M81S2302174	_____	_____
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
<b>Equipos de Prueba</b>	<b>Número de Serie</b>		
Medidor de presión de gases/aire	_____		
_____	_____		
_____	_____		
<b>Estándares Utilizados</b>	<b>Número de Lote</b>	<b>Fecha de Expiración</b>	
N069-1579 Multi-Element Standard	57-208CRX1	30-08-2023	
N058-2152 Wave Cal Solution	58-110CRX1	30-07-2023	
N930-2946 VIS Wavecal Solution	57-023CRT1	30-09-2023	
N930-0221 Standard 4	57-156CRY1	30-09-2023	
<b>Suministrado por Cliente</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Iniciales de Cliente</b>	
Agua destilada	_____	A.V.	
_____	_____	_____	

	<b>CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO ICP-OES AVIO 550</b>	CÓDIGO : FGPV_CVR_ICPAVIO550M
		REVISIÓN : 00 APROBADO : JPV ELABORADO: APV FECHA : 23/04/21

CERTIFICADO N.º: CM00137-2023 FECHA DE EVALUACIÓN: MAYO 19, 2023

**1.- Calibración de longitudes de onda UV y VIS.**

Coeficientes UV			Coeficientes VIS		
0.01206	≤	1.50	0.13176	≤	2.00
0.26510	≤	1.50	0.13944	≤	2.00
3.67757	≤	6.00	5.93660	≤	8.00

Intensidad de lámpara de Mercurio: 14039284.1 Slit: 1776

**2.- Relación de las vistas Axial / Radial (Mn 257.610 nm), con 1ppm de Mn para ambas vistas.**

Especificación de Relación Axial / Radial	Intensidad de la vista Axial	Intensidad de la vista Radial	Relación Axial / Radial	Pasó / No Pasó
≥ 2.5	358956.5	41568.4	8.6	Pasó

**3.- Radial BEC para Mn (257.610nm): BEC-RL, para calcular: BEC = (IB \* Standard Conc.) / (IS - IB)**

Especificación BEC (ug / L)	Intensidad de "IB (2% HNO3) = IB"	Intensidad de "IS RL (N0691579)" = IS	Mn BEC (IB*10000/IS-IB)	Pasó / No Pasó
≤ 45	897.3	1156193.5	7.7	Pasó

**4.- Axial Detection Limits: DL-2-XL, para la muestra IDL (2% HNO3), anotar el valor de la desviación estándar (SD). No multiplicar la desviación estándar por 3, esto se hizo en el archivo de información de muestra.**

Elemento	Std.Dev.Sample Units ug/L	Especificación (ug/L)	Pasó/No Pasó
Tl 190.801	0.28	≤ 10	Pasó
As 193.696	1.78	≤ 10	Pasó
Se 196.026 (Scott)	N/A	N/A	---
Se 196.026 (Cyclone)	1.48	≤ 5	Pasó
Pb 220.353	1.37	≤ 3	Pasó

**5.- Radial Detection Limits: DL-2-RL, para la muestra IDL (2% HNO3), anotar el valor de la desviación estándar (SD). No multiplicar la desviación estándar por 3, esto se hizo en el archivo de información de muestra.**

Elemento	Std.Dev.Sample Units ug/L	Especificación (ug/L)	Pasó/No Pasó
As 193.696	1.89	≤ 60	Pasó
Zn 213.856	1.76	≤ 2	Pasó
Mn 257.610	0.49	≤ 0.75	Pasó
La 379.478	0.23	≤ 3	Pasó
Ba 455.403	0.19	≤ 0.3	Pasó
Ba 493.408	0.39	≤ 0.6	Pasó



**CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN  
DE RENDIMIENTO  
ICP-OES AVIO 550**

CÓDIGO : FGPV\_CVR\_ICPAVIO550M  
REVISIÓN : 00  
APROBADO : JPV  
ELABORADO: APV  
FECHA : 23/04/21

CERTIFICADO No.: CM00137 2023 FECHA DE EVALUACIÓN: MAYO 19, 2023

**6.- Precision: Precision-XL**, para la muestra RSD STD (N0691579), anotar el valore de %RSD.

Elemento	% RSD	Especificación (%)	Pasó/No Pasó
As 193.696	0.51	≤ 1	Pasó
Zn 213.856	0.33	≤ 1	Pasó
Mn 257.610	0.68	≤ 1	Pasó
La 379.478	0.69	≤ 1	Pasó
Ba 455.403	0.55	≤ 1	Pasó
Ba 493.408	0.71	≤ 1	Pasó

**7.- Stability: Stability-XL**, todas las muestras (STAB N0691579) deben estar entre 95 mg/L a 105 mg/L.

Elemento	Valor Obtenido	Pasó/No Pasó
Zn 206.200	99.5	Pasó
Mg 280.271	99.1	Pasó
Mg 285.213	101.5	Pasó
Mn 257.610	100.1	Pasó
Ba 455.403	100.3	Pasó

**8.- Resolution: RES-ONLY-XL**, anotar el valor más alto de las 3 réplicas de la muestra RES(N0691579) hallados en C:\Users\Public\PerkinElmer Syngistix\ICP\SystemFiles\Log Files\Analysis.logx

Elemento	Resolution	Especificación (nm)	Pasó/No Pasó
As 193.696 – Res	0.005	≤ 0.007	Pasó
Ni 231.604 – Res	0.007	≤ 0.008	Pasó
Ni 341.476 – Res	0.008	≤ 0.012	Pasó
La 408.672 – Res	0.010	≤ 0.020	Pasó
Ba 455.403 – Res	0.014	≤ 0.025	Pasó

**CONCLUSIONES :** Las pruebas pasaron satisfactoriamente.

Este documento CERTIFICA que las pruebas realizadas y la configuración evaluada

cumple  
 no cumple

Con las especificaciones de PERKIN ELMER, indicadas en este Certificado.

Este documento no modifica los términos estándar y las condiciones de venta de PERKIN ELMER, incluyendo los términos de garantía. PERKIN ELMER no asume compromiso por los resultados de las pruebas,

CERTIFICA ANDINA S.A.C.  
Área de Post Venta

Ing. Cesar Morales Gil

Ing. de Servicio

Firma del Cliente

f. Espectrofotómetro UV – visible



INFORME DE VERIFICACIÓN OPERACIONAL  
N°0020000200-23 III



MARCA SHIMADZU

MODELO UV-1900i



---

 TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INFORMACIÓN PRELIMINAR</b>	<b>3</b>
1.1. Datos del Cliente.....	3
1.2. Control ambiental del lugar de instalación.....	3
1.3. Componentes del Sistema.....	3
1.4. Identificación del Sistema de Cómputo.....	4
1.5. Partes Consumibles Empleadas.....	4
1.6. Otros Datos.....	4
<b>2. VERIFICACIÓN OPERACIONAL</b>	<b>5</b>
2.1. Exactitud y Repetibilidad de Longitud de Onda (Líneas D2).....	5
2.2. Exactitud Longitud de Onda (Filtro de Holmio) .....	7
2.3. Exactitud y Repetibilidad Fotométrica.....	8
2.4. Plenitud de Línea base .....	10
2.5. Nivel de Ruido y estabilidad fotométrica de Línea Base.....	11
2.6. Resolución .....	13
<b>3. CONCLUSIONES</b>	<b>14</b>
<b>4. RECOMENDACIONES</b>	<b>14</b>
<b>5. ANEXOS</b>	<b>15</b>

## 1. INFORMACIÓN PRELIMINAR

## 1.1. Datos del Cliente

Entidad	SISTEMA DE SERVICIOS Y ANALISIS QUIMICOS S.A.C
Responsable del Instrumento	KATHERINE CORAL
Dirección	CALLE 22 MZA E. LOTE 07. URB. VIPOL NARANJAL LIMA; LIMA; SAN MARTIN DE PORRES
Departamento	LIMA

## 1.2. Control ambiental del lugar de Instalación

	Criterio	Estado	Pasa
Lugar de instalación adecuado	Libre de polvo	Libre de polvo	SI
Mesa de Trabajo	Estable	Estable	SI
Temperatura adecuada	15°C < T < 35°C	23,9°C	SI
Humedad del ambiente adecuado	35% < HR < 80%	50%	SI

## 1.3. Componentes del Sistema

NOMBRE DE COMPONENTE	MODELO	NÚMERO DE SERIE	CÓDIGO INTERNO
ESPECTROFOTÓMETRO UV-VISIBLE	UV-1900i	A12535801334	LAB-22

**1.4. Identificación del Sistema de Computo**

Tipo	-		
Marca:	HP	Memoria RAM	12GB RAM
Procesador:	CORE i5	Disco Duro	500 GB
Monitor:	hp	Mouse	GENIUS
Teclado:	PCTRONIC	Impresora	-----

**1.5. Partes Consumibles**

-	<input type="checkbox"/>

**1.6. Otros datos**

Fecha de realización de Verificación Operacional:

03 de Marzo del 2023

Realizado por:



DOUGLAS E GERALDO B  
 TECNICO ESPECIALISTA

Revisado por:



KATHERINE  
 CORRAL PERALTA  
 Ingeniera Química  
 CIP N° 276377

CLIENTE

## 2. VERIFICACIÓN OPERACIONAL

### 2.1. Exactitud y Repetibilidad de Longitud de Onda

#### Exactitud de Longitud de Onda (Lineas de Emisión de Deuterio)

##### Objetivo

Verificar la exactitud de longitud de onda del instrumento utilizando las líneas de emisión (656.1nm y 486.0nm) de la lámpara D2 equipada.

##### Procedimiento

1.	Ingresar al modo "Spectrum".
2.	Ingresar los siguientes parámetros de medición y realizar la medición: [Medición] Rango de Longitud de Onda : 660 a 650 nm Velocidad de Barrido : Media Intervalo de Muestreo : 0.05 nm [Parámetros Instrumento] Modo de Medición : Energía Fuente de Luz : D2
3.	Registrar el valor de longitud de onda de la línea de emisión de D2
4.	Cambiar el Rango de Longitud de Onda a 490 a 480 nm en los parámetros, realizar la medición y registrar.

##### Criterio:

Longitud de onda (1) = 656.1 ±0.3 nm  
Longitud de onda (2) = 486.0 ±0.3 nm

##### Resultado:

Valor Teórico	Valor Real	Diferencia	Conclusión
656.10 nm	656.15	0.05 nm	Pasa
486.0 nm	486.15	0.15 nm	Pasa

**Repetibilidad de Longitud de Onda (Líneas de emisión de Deuterio)**
**Objetivo**

Verificar la repetibilidad de longitud de onda del instrumento utilizando las líneas de emisión (656.1nm y 486.0nm) de la lámpara D2 equipada.
--

**Procedimiento**

1.	Ingresar al modo "Spectrum".
2.	Aplicando los parámetros de medición de las líneas de emisión de D2, medir por triplicado el valor de longitud de onda.
3.	Registrar los valores y obtener un promedio.

**Criterio:**

Desviación de la media de las tres mediciones $\pm 0.20$ nm
---

**Resultado:**

Valor Teórico	Valor Real	Promedio	Diferencia	Conclusión
656.10 nm	656.15 nm 656.15 nm 656.15 nm	656.15 nm	0 nm	Pasa
486.00 nm	486.15 nm 486.15 nm 486.15 nm	486.15 nm	0 nm	Pasa

## 2.2. Exactitud de Longitud de Onda (Filtro de Holmio)

## Objetivo

Utilizar el filtro de calibración de longitud de onda (filtro estándar) para verificar la precisión de la longitud de onda del instrumento.
---

## Procedimiento

1.	Ingresar al modo "Spectrum".
2.	Ingresar los siguientes parámetros de medición y realizar la medición: [Medición] Rango de Longitud de Onda : 700 a 200 nm Velocidad de Barrido : Media Intervalo de Muestreo : 0.05 nm [Parámetros Instrumento] Modo de Medición : Transmitancia Fuente de Luz : D2
3.	Registrar el valor de longitud de onda de la línea de emisión de D2

## Criterio:

Diferencia entre el valor de referencia $\pm 0.50$ nm
---

## Resultado:

Valor Teórico	Valor Real	Diferencia	Conclusión
641.53	641.60	0.07	PASA
537.18	537.25	0.07	PASA
472.76	473.00	0.24	PASA
457.58	457.75	0.17	PASA
452.73	452.90	0.17	PASA
447.53	447.60	0.07	PASA
417.58	417.75	0.17	PASA
360.29	360.55	0.26	PASA
333.74	334.15	0.41	PASA
287.40	287.70	0.30	PASA
278.70	279.05	0.35	PASA
260.73	260.90	0.17	PASA
241.45	241.55	0.10	PASA
219.72	219.80	0.08	PASA

Equipo	Marca	N°. Serie	Certificado Calibración
Filtro de Vidrio de Holmio RM-HG	STARNA	38145	103072

## 2.3. Exactitud y Repetibilidad Fotométrica

## Exactitud fotométrica

## Objetivo

Verificar la exactitud fotométrica del sistema, utilizando la medición de absorbancia de un filtro estándar.
--

## Procedimiento

1.	Seleccione la opción Photometric del programa principal.
2.	Asegúrese que el portamuestras se encuentre libre y luego de ello lleve a cabo la función Auto Zero, presionando el botón Auto Zero del Espectrofotómetro.
3.	Registre los valores de absorbancia a los siguientes valores de longitud de onda: 440.0, 465.0, 546.1, 590.0, 635.0 nm, utilizando el botón Go To WL. Registre estos valores como blanco para cada longitud de onda.
4.	Coloque en la portamuestras los filtro estándar de 10%, 30% y mida la absorbancia para cada valor de longitud de onda
5.	La diferencia entre el valor del filtro menos el valor del blanco para cada una de estas longitudes de onda, se toman como el valor de la exactitud fotométrica.

## Criterio:

Exactitud Fotométrica a 10% $\pm$ 0.0080 Abs
Exactitud Fotométrica a 30% $\pm$ 0.0080 Abs

## Resultados:

## Con Filtro Estándar de 10%

Filtro	Longitud de Onda	Valor Teórico	Valor Real	Diferencia	Conclusión
10%	440.0	0.9805	0.9809	0.0004	PASA
	465.0	0.9247	0.9249	0.0002	
	546.1	0.9783	0.9783	0.0000	
	590.0	1.0875	1.0867	-0.0008	
	635.0	1.0732	1.0732	0.0000	

## Con Filtro Estándar de 30%

Filtro	Longitud de Onda	Valor Teórico	Valor Real	Diferencia	Conclusión
30%	440.0	0.5579	0.5592	0.0013	PASA
	465.0	0.5203	0.5215	0.0012	
	546.1	0.5218	0.5230	0.0012	
	590.0	0.5559	0.5569	0.0010	
	635.0	0.5634	0.5648	0.0014	

**Repetibilidad fotométrica**

**Objetivo**

Verificar la repetibilidad fotométrica del sistema, utilizando la medición de absorbancia de un filtro estándar.

**Procedimiento**

1.	Seleccione la opción Photometric del programa principal.
2.	Asegúrese que el portamuestras se encuentre libre y luego de ello lleve a cabo la función Auto Zero, presionando el botón Auto Zero del Espectrofotómetro.
3.	Registre los valores de absorbancia a los siguientes valores de longitud de onda: 635.0 nm, utilizando el botón Go To WL. Registre estos valores como blanco para la longitud de onda
4.	Coloque en la portamuestras los filtro estándar de 10%, 30% y mida la absorbancia para el valor de longitud de onda
5.	Los valores del promedio del blanco de la longitud de onda, se toman como el valor de la repetibilidad fotométrica.

**Criterio:**

Exactitud Fotométrica a 10% ± 0.0040 Abs  
Exactitud Fotométrica a 30% ±0.0020 Abs

**Resultados:**

**Filtro de 10%**

WL (nm)	Tolerancia (Abs)	Valores reales			Promedio	Deflección (Abs)	Conclusión
635.0	± 0.0040	1.0737	1.0737	1.0737	1.0737	0.000	PASA

**Filtro de 30%**

WL (nm)	Tolerancia (Abs)	Valores reales			Promedio	Deflección (Abs)	Conclusión
635.0	± 0.0020	0.5648	0.5648	0.5648	0.5648	0.000	PASA

Equipo	Marca	N°. Serie de Set	Número de Archivo de Análisis
Filtro de Densidad Neutra RM-1N2N3N	STARNA	35462	94298

## 2.4. Plenitud de Línea Base

## Objetivo

Verificar la planitud de la línea de base en un rango de longitud de onda de 190 nm a 1100 nm
---

## Procedimiento

1.	Ingresar al modo "Spectrum".
	Ingresar los siguientes parámetros de medición y realizar la medición: [Medición]
	Rango de Longitud de Onda : 1100 a 190 nm
	Velocidad de Barrido : Media
2.	Intervalo de Muestreo : 0.5 nm
	[Parámetros Instrumento]
	Modo de Medición : Absorbancia
	Long.Onda de Cambio de Lámpara : 340 nm
3.	Registrar el valor central obtenido respecto de la señal cero.

## Criterio:

Planitud de Línea Base $\pm 0.0010$ Abbs
--

Rango WL (nm)	Tolerancia	Plenitud	Conclusión
1100 - 190	$\pm 0.0010$	$\pm 0.0001$	Pasa

## 2.5. Nivel de Ruido y estabilidad fotométrica de Línea Base

## Nivel de Ruido de Línea Base

## Objetivo

Verificar la señal de disturbios que puede contribuir como parte de una señal analítica.
--

## Procedimiento

1.	Ingresar al modo "Kinetics".
	Ingresar los siguientes parámetros de medición y realizar la medición: [Medición]
	Rango de Registro : - 0.01 a 0.01 (variable)
	Ancho de Rendija : 1.0 nm
2.	Rango de Longitud de onda (nm) : 700 y 500 nm
	Razón de Adquisición de Datos : Auto
	Tiempo : 60 segundos
	[Parámetros Instrumento]
	Modo de Medición : Absorbancia
3.	Registre el valor de la variación de la absorbancia por 60 segundos y lea el máximo valor de la amplitud registrada. Dicho valor se toma como el nivel de ruido del sistema.

## Criterio:

Nivel de Ruido P-P $\leq$ 0.00030 Abs RMS $\leq$ 0.00050 Abs
---

## Resultado:

WL	Valor Real P-P	Valor Real RMS	Criterio P-P	Criterio RMS	Conclusión
700 nm	0.00003 Abs	0.000018 Abs	$\leq$ 0.00030 Abs	$\leq$ 0.000050 Abs	PASA
500 nm	0.00005 Abs	0.00001 Abs	$\leq$ 0.00030 Abs	$\leq$ 0.00050 Abs	PASA

**Estabilidad Fotométrica**
**Objetivo**

Verificar la estabilidad fotométrica que puede contribuir como parte de una señal analítica.

**Procedimiento**

1.	Ingresar al modo "Time course".
2.	Ingresar los siguientes parámetros de medición y realizar la medición: [Medición] Rango de Registro : - 0.01 a 0.01 (variable) Ancho de Rendija : 1.0 nm Rango de Longitud de onda (nm) : 700 nm Razón de Adquisición de Datos : Auto Tiempo : 3600 segundos [Parámetros Instrumento] Modo de Medición : Absorbancia
3.	Registre el valor de la variación de la absorbancia registrada por 3600 segundos

**Criterio:**

Estabilidad fotométrica  $\leq 0.0010$  Abs

**Resultado:**

WL (nm)	Tolerancia (Abs/H)	Valor Drift (Abs/H)	Conclusión
700	$\leq 0.0010$	0.0000	Pasa

**2.6. Resolución**

**Objetivo**

Verificar la habilidad del espectrofotómetro para resolver picos adyacentes a longitudes de onda muy cercanas una de otra en un intervalo de onda muy pequeño.

**Procedimiento**

<b>1.</b>	Ingresar al modo "Kinetics".
<b>2.</b>	Ingresar los siguientes parámetros de medición y realizar la medición: [Medición] Modo de Medición : Energía Velocidad de Barrido : Lento Ancho de la Rendija : 1 nm Lámpara de Trabajo : Deuterio Rango de Longitud de Onda (nm) : 645.0 a 667.0 nm  [Parámetros Instrumento] Modo de Medición : Absorbancia
<b>3.</b>	Verifique y registre la mitad del ancho de banda del espectro de línea de emisión indicado para determinar la resolución

**Criterio:**

Valor alrededor de 1.00 nm±0.20nm

**Resultado:**

Tolerancia (nm)	Ganancia	Bandwidth (nm)	Conclusión
1.00 ±0.20	0	1.06	Pasa

Pasa [✓]

**3. CONCLUSIONES**

- El espectrofotómetro UV-VIS marca Shimadzu, Modelo UV-1900i, se encuentra en óptimas condiciones de trabajo y cumple con las especificaciones técnicas del fabricante. Se encuentra apto para llevar a cabo los ensayos solicitados por el usuario.

**4. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda verificar, mediante la función "Mantenimiento" del sistema, el total de horas de uso de la lámpara, para prevenir el tiempo estimado de reemplazo. (Máximo 2000 horas por cada lámpara)  
- Colocar la sílica gel para mantener el interior del compartimento de muestra para que esté libre de humedad.  
- Se recomienda que el equipo se mantenga en un ambiente controlado con temperatura entre 15 a 35 °C, y humedad relativa entre 35% a 80% y sin condensación (si supera los 30 °C, debe tener como máximo 70% de Hr).  
- El equipo debe mantenerse libre de polvo, luz solar directa, gases corrosivos y su toma de alimentación cuenta con punto a tierra.

## Anexo 5: Registro fotográfico

### Figura 14

*Toma de muestras de lodos residuales de acuicultura*



*Nota.* Piscigranja Pariamarca, Canta – Lima.

### Figura 15

*Proceso de secado de lodos residuales de acuicultura*



*Nota.* (a) Secado a la intemperie por 5 días, (b) Pesado de lodos residuales de acuicultura y (c) Secado en horno eléctrico convectivo por 24 h.

## Figura 16

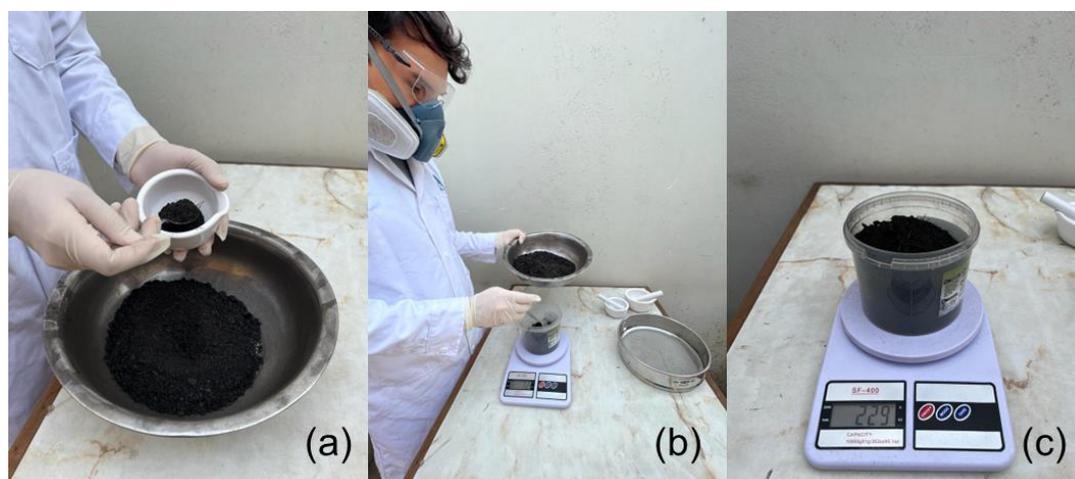
### *Pirólisis de lodos residuales de acuicultura*



*Nota.* (a) Pesado de 300g de muestra de lodo residual de acuicultura, (b) Alimentación del reactor pirolítico, (c) Cierre hermético del reactor pirolítico y (d) Proceso de pirólisis a 500 °C y 700 °C.

## Figura 17

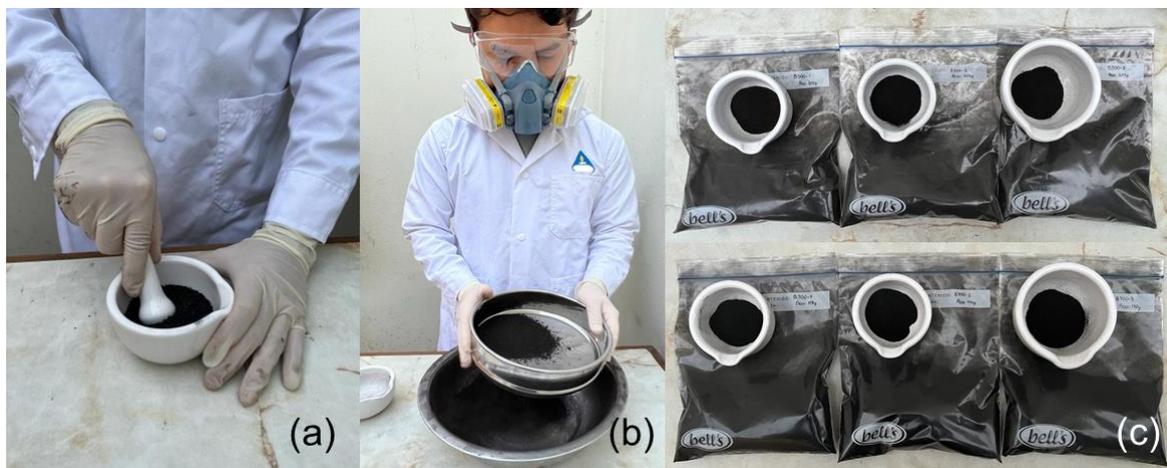
### *Cálculo del rendimiento de producción de biocarbón*



*Nota.* (a) Obtención de biocarbón, (b) Pesado del biocarbón obtenido, (c) Cálculo del rendimiento de producción del biocarbón.

## Figura 18

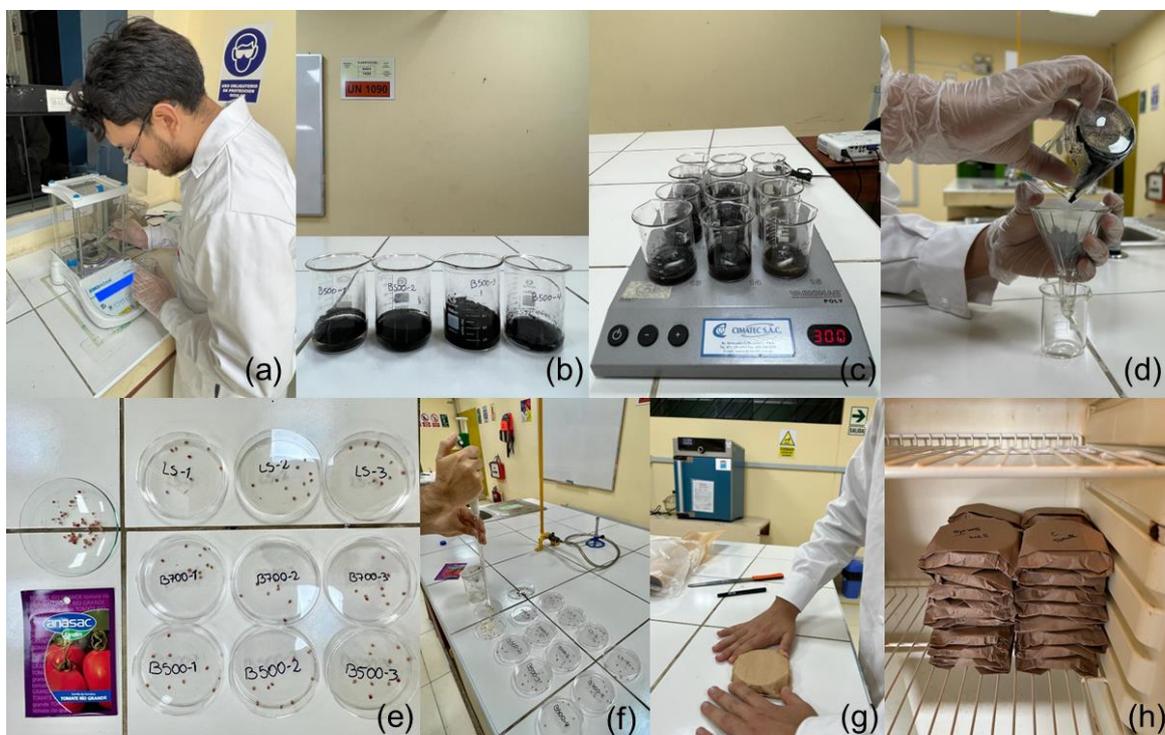
### Molienda y tamizado del biocarbón



Nota. (a) Molienda del biocarbón, (b) Tamizado del biocarbón, (c) Empaquetado del biocarbón.

## Figura 19

### Procedimiento del ensayo de fitotoxicidad



Nota. (a) Pesado de 1g de muestra, (b) Preparación de lixiviado a proporción 1:10, (c) Agitación de las muestras, (d) Filtrado del lixiviado, (e) Colocación de 10 semillas de tomate en placas Petri, (f) Inoculación del lixiviado a las semillas, (g) Empaquetado de placas Petri y (h) Incubación de las muestras.